

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

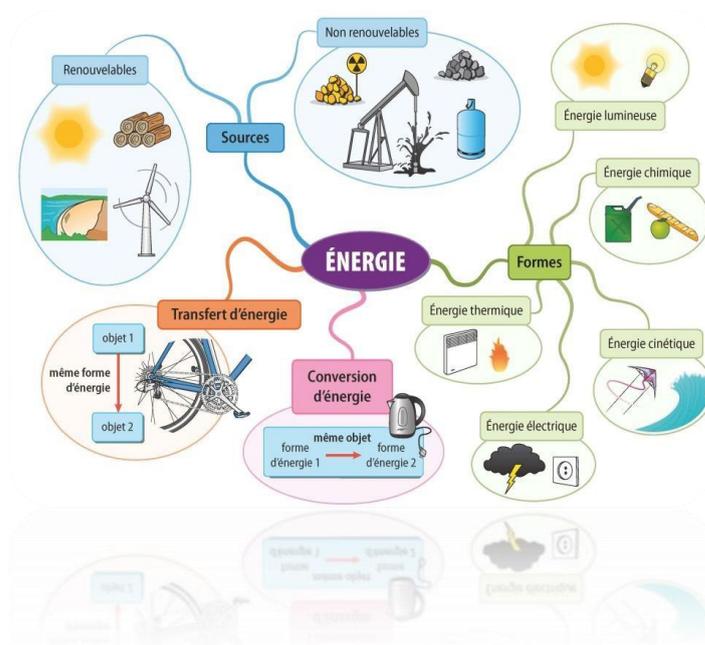


Université Mohamed Khider -Biskra  
Faculté des Sciences et Technologies  
Département de Génie Electrique



Support de Cours Pédagogique

# Conversion d'Énergie



Synthèse du cours

Conversion D'énergie

Par :

**Dr. MOHAMED Rezig**

Maître de Conférences en Electrotechnique à l'Université Mohamed Khider de Biskra

*Année Universitaire 2018-2019*

## *Avant-propos*

L'ensemble des chapitres présentés dans ce document ont été effectués au sein du Laboratoire : LMSE de Génie Electrique de l'Université Mohamed Khider de Biskra.

Le recueil présenté contient trois parties à savoir :

- ✚ L'énergie et les variables énergétiques
- ✚ La conversion d'énergie électromécanique
- ✚ Autres formes de conversion

### **Objectifs de l'enseignement:**

L'objectif essentiel de ce cours est de montrer à l'étudiant Comment convertit-on une forme d'énergie en une autre pour la rendre utilisable dans le domaine de l'électromécanique.

Ce support de cours est destiné aux étudiants Licence Electromécanique.

Cette partie sera consacrée à l'étude de l'énergie et ces conversions. L'énergie que nous utilisons chaque jour provient de sources renouvelables et non renouvelables. Nous expliquerons le fonctionnement des divers convertisseurs électromécaniques et en donnerons des modèles élémentaires. Les conversions photovoltaïques et énergie solaire d'une part pour faire une étude sur le rendement ainsi la conversion calorifique avec les moteurs à combustible.

J'espère que ce cours sera apprécié par tout le monde (enseignants et les étudiants).

**Dr M.REZIG**

# SOMMAIRE

## Chapitre 1 : L'énergie et les variables énergétiques

1. Énergie et formes d'énergie,
2. Les unités d'énergie et de puissance,
3. Dimensionnement de la chaîne de puissance,

## Chapitre 2 - La conversion d'énergie électromécanique

1. Généralités : Structure technologique des convertisseurs électromécaniques (Les modèles théoriques de convertisseurs tournants),
2. Classification des convertisseurs,
3. Variation de l'énergie électromagnétique du système,

## Chapitre 3 - Autres formes de conversion

1. Conversion photovoltaïque et énergie solaire
2. Conversion d'énergie calorifique et moteur à combustion.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

**D**e tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, eau, vent, soleil...). L'énergie est un enjeu majeur, tant au niveau politique, économique, scientifique que qu'environnemental...

**L'**énergie contenue dans la matière est invisible, mais la lumière, le mouvement, le vent, les vagues font partie de ses manifestations. À l'état brut ou « domestiquée » par l'Homme, elle a la propriété de se transmettre d'un objet à un autre, souvent en se transformant. Mais elle n'est jamais ni créée ni détruite : l'Univers en contient une quantité finie et constante.

**L'**énergie est un des éléments fondamentaux de notre univers. Nous employons l'énergie pour effectuer un travail utile dans notre quotidien. L'énergie éclaire nos villes. L'énergie actionne nos véhicules, les trains, les avions et les fusées. L'énergie chauffe nos maisons, fait cuire notre nourriture, nous permet d'écouter de la musique et nous donne des images à la télévision. L'énergie actionne des machines dans les usines. Quand nous mangeons, notre corps transforme la nourriture en énergie pour effectuer un travail comme marcher, lire ou courir. Les voitures, les avions, les chariots, les bateaux et les machines transforment également l'énergie en travail. Le travail signifie déplacer quelque chose, soulever quelque chose, chauffer quelque chose, allumer quelque chose.



# L'énergie et les variables énergétiques

## Problématique énergétique

La consommation actuelle repose presque entièrement sur l'usage des énergies fossiles : (le **pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium**). Les réserves d'énergies fossiles sont limitées (alors que la consommation mondiale d'énergie augmente) et polluantes (augmentation des émissions de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique. Avec pour conséquence un réchauffement climatique global de la planète).

### I.1 Définition

L'énergie est de manière générale, la capacité de faire un travail, c'est-à-dire d'agir. Ce terme recouvre plusieurs réalités qui se recoupent partiellement :

- L'énergie au sens de la science physique est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur ;
- Au sens de l'écologie et de l'économie, on appelle énergie une ressource énergétique naturelle (énergie éolienne, énergie nucléaire, énergie solaire, gaz naturel, pétrole) ou son produit (électricité), lorsqu'ils sont consommés par les sociétés humaines pour divers usages industriels et domestiques (transport, chauffage...).

Le soleil, le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, les matériaux nucléaires, les réserves d'eau, le vent ... sont des sources d'énergie primaires (voir fig1) .



Figure I.1 : Les sources d'énergie primaires

## I.2 Les formes d'énergie

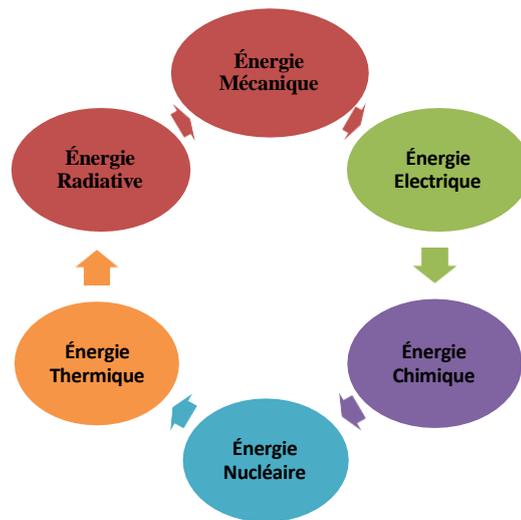


Figure I.2 : Les formes d'énergie

- a) **Énergie mécanique** : c'est l'énergie cinétique d'une voiture qui provient de la combustion du fuel dans le moteur aussi c'est l'énergie potentielle de l'eau dans un barrage.
- b) **Énergie électrique** : Correspond au déplacement de courants électriques dans des corps conducteurs (dans la plupart des cas des métaux).
- c) **Énergie chimique** :  
La création de liaisons chimiques se traduit par une libération d'énergie, généralement sous forme de chaleur. A l'inverse, la rupture de ces liaisons nécessite aussi de l'énergie. Ainsi, une réaction chimique peut être **exothermique** (libère globalement de l'énergie) ou **endothermique** (consomme de l'énergie).
- d) **Énergie nucléaire** : Énergie libérée par des réactions impliquant le noyau de certains atomes (réactions nucléaires), soit par fission des noyaux, soit par fusion.
- e) **Énergie thermique** : on l'obtient de plusieurs sources : soleil, combustion du bois et des fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou électricité (effet Joule).

**6- Énergie radiative (rayonnante ou lumineuse):** se dégage d'une source de lumière (soleil, feu ou ampoule électrique). L'énergie rayonnante du soleil est au cœur du phénomène de la photosynthèse (toutes les plantes grandissent et se développent grâce à lui) et du cycle naturel de l'eau (avec la phase d'évaporation).

### I.3 Tableau des différentes formes d'énergie.

- Le monde qui nous entoure produit naturellement différentes formes d'énergie (énergie associée à un objet en mouvement, énergie thermique, électrique...).
- Prendre conscience que l'être humain a besoin d'énergie pour vivre, se chauffer, se déplacer, s'éclairer...

Énergie cinétique	Énergie potentielle de position	Énergie chimique	Énergie thermique	Énergie nucléaire	Énergie de rayonnement	Énergie électrique
Une voiture de masse $m$ animée d'une vitesse $v$ possède de l'énergie cinétique.	Du fait de sa position, un cueilleur possède de l'énergie potentielle de position qui peut être convertie en énergie cinétique lorsqu'il tombe.	Le bois possède de l'énergie chimique qui lors de la combustion est convertie en énergies lumineuses et thermiques.	Un chocolat chaud possède de l'énergie thermique qui peut être transférée à celui qui le boit.	L'uranium possède de l'énergie nucléaire qui peut être convertie en énergie thermique dans les centrales.	Le Soleil transmet par rayonnement de l'énergie qui nous réchauffe et qui fait pousser les plantes.  Les filaments des ampoules électriques	La pile transmet par le courant électrique l'énergie électrique qui fait tourner le moteur.
						

Tableau I.1 : Les Sources d'énergie

### I.4 Transferts et conversions d'énergie

L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. Elle peut être transférée d'un objet à un autre ou convertie d'une forme en une autre.

Lorsque l'énergie d'un corps est transmise à d'autres corps on parle alors de transfert d'énergie, Lorsque l'énergie d'un corps change de forme on parle alors de conversion d'énergie. A propos des transformations chimiques **Lavoisier (1743 – 1794)** avait énoncé une règle simple : « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* ».

Cette règle aussi vraie pour l'énergie : Lorsqu'une énergie diminue celle-ci n'est pas perdue: elle soit transférées à d'autres corps soit convertie en d'autres formes d'énergie. Lorsqu'une énergie augmente elle ne se crée pas à partir de rien: elle provient d'autres corps ou résulte de la conversion d'autres énergies.

#### I.4.1 Transferts d'énergie

Un système peut échanger de l'énergie avec son environnement. On peut définir une multitude de systèmes mais il existe seulement 4 types de transfert d'énergie



Figure I.3 : Les différents transferts d'énergie

#### I.4.2 Convertisseurs énergétiques

L'Homme ne crée pas d'énergie. Aucun animal, aucun être vivant, rien de cela sur Terre ne crée de l'énergie. Ce que nous faisons, c'est transformer de l'énergie d'une forme à une autre forme. Le monde contient beaucoup de "systèmes" qui transforment de l'énergie d'une forme à une autre. Une plante verte transforme de l'énergie de rayonnement électromagnétique (rayons du soleil) en énergie chimique : c'est la photosynthèse.

Les formes d'énergie peuvent donc se transformer. Quels sont les principes et les systèmes qui permettent ces transformations ? Voyons :

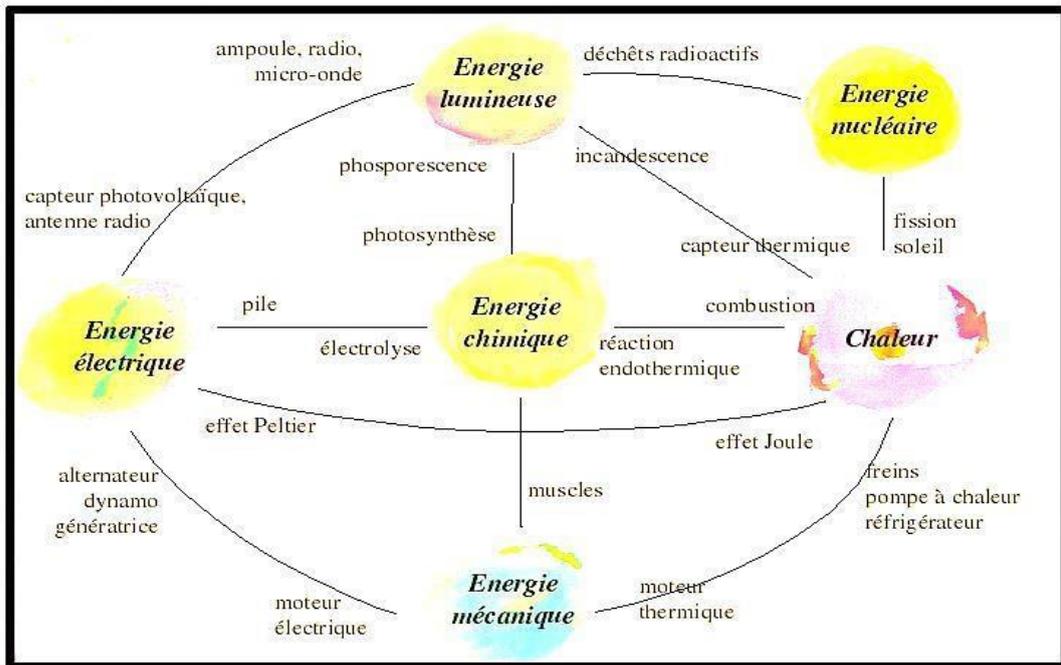


Figure I.4 : Le système de transfert d'énergie

Toutes les conversions ne sont pas encore disponibles. La base de données se remplira petit à petit.

#### I.4.2.1 L'oxydo-réduction

Énergie chimique → Énergie rayonnante  
 Énergie chimique → Énergie mécanique  
 Énergie chimique → Énergie électrique

#### I.4.2.2 La combustion

Énergie chimique → Énergie thermique

#### I.4.2.3 Les frottements

Énergie mécanique → Énergie thermique

#### I.4.2.4 Le pompage

Énergie mécanique → Énergie chimique  
 Énergie mécanique → Énergie hydraulique

#### **I.4.2.5 L'effet Joule**

Energie mécanique -> Energie électrique

Energie électrique -> Energie thermique

#### **I.4.2.6 L'effet Seebeck**

Energie électrique -> Energie chimique

Energie électrique -> Energie rayonnante

Energie électrique -> Energie mécanique.

#### **I.4.2.7 La turbine à vapeur et l'alternateur (indirect)**

Energie thermique -> Energie électrique

#### **I.4.2.8 Incandescence / Rayonnement infrarouge**

Energie thermique -> Energie chimique

Energie thermique -> Energie rayonnante

Energie thermique -> Energie mécanique

#### **I.4.2.9 L'effet photovoltaïque**

Energie rayonnante -> Energie électrique

#### **I.4.2.10 L'absorption**

Energie rayonnante -> Energie chimique

Energie rayonnante -> Energie thermique

Energie hydraulique -> Energie mécanique

Energie nucléaire -> Energie thermique

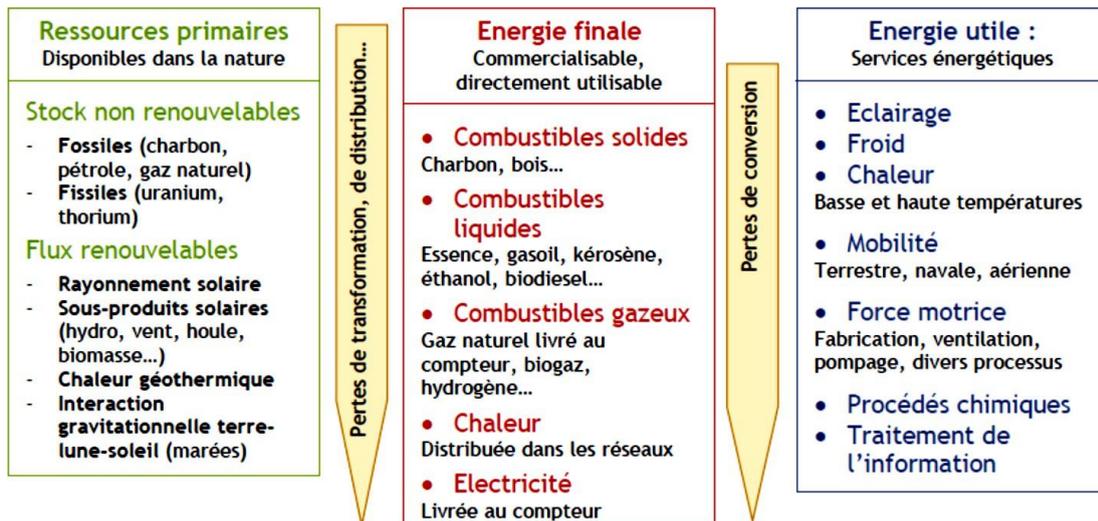
### **I.5 Rendement énergétique et efficacité énergétique**

En physique, l'énergie est une grandeur unifiée qui permet de quantifier diverses transformations d'un système. Elle se manifeste sous forme de chaleur, de travail mécanique se traduisant par une mise en mouvement, de rayonnement électromagnétique, de transformations chimiques (à l'échelle moléculaire) ou nucléaires (à l'échelle des noyaux atomiques).

D'un point de vue physique, l'énergie ne se produit pas, ni se consomme, elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre. Assurer un service (déplacement, éclairage,

chauffage...), nécessite des transformations, donc une dépense d'énergie. L'énergie est transformée par un convertisseur d'énergie qui dépend du service à réaliser ; un convertisseur peut être un moteur électrique ou thermique, une lampe ou une chaudière...

Le rendement énergétique est le rapport entre deux quantités, l'énergie « produite », c'est-à-dire l'énergie utile pour réaliser un service, sur l'énergie « consommée », c'est-à-dire l'énergie absorbée pour réaliser ce service. L'efficacité énergétique est la quantification de la « consommation » d'énergie pour assurer un service, avec l'idée de la minimiser grâce à des technologies plus efficaces. Dans la plupart des cas, les services convertissent de l'énergie finale, qui est une forme d'énergie commercialisée et directement consommable. L'énergie finale est transformée à partir de ressources primaires (figure I.5). Les ressources énergétiques primaires sont disponibles à l'état brut dans la nature, on peut les classer en deux catégories, celles de stocks non renouvelables (fossiles et fissiles) et celles de flux renouvelables. Les formes d'énergie finale sont directement utilisables dans les convertisseurs. L'énergie utile correspond quant à elle aux services énergétiques attendus.



**Figure I.5 :** Des ressources primaires aux services énergétiques image B. Multon

On parle souvent de *producteurs d'énergie* (sous entendue finale) et de *consommateurs d'énergie* finale. Il s'agit d'une vision consumériste des conversions énergétiques mais dans tous les cas, il s'agit bien de **transformations énergétiques**.

Cependant, il semble pertinent de distinguer l'efficacité selon deux points de vue :

- La production d'énergie finale à partir de ressources primaires,
- La consommation d'énergie finale pour la transformer en service.

Au sein de ces procédés, se trouvent plusieurs convertisseurs d'énergie. Par exemple, produire de l'électricité à partir de combustibles non renouvelables (fossiles ou fissiles) nécessite :

- Une extraction minière avec des machines équipées de *moteurs* qui consomment de l'énergie finale (hydrocarbures liquides, électricité...),
- Des transformations des minerais en matières premières (acier, cuivre, terres rares...) par des procédés industriels exploitants également divers *convertisseurs*,
- Les transports et raffinage pour obtenir le combustible de qualité souhaitée,
- Enfin une conversion finale du combustible en électricité à l'aide de *brûleurs*, *turbines*, *générateurs*, *transformateurs*... tous des convertisseurs d'énergie.

Le service associé à des kilomètres parcourus avec une automobile nécessite également nombre de convertisseurs d'énergie. Tout d'abord pour fabriquer le véhicule depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son recyclage en fin de vie. Puis, lors de son utilisation où l'énergie finale est consommée via le *moteur* en fonction de la taille du véhicule et de la conduite de son chauffeur.

Les questions de rendement énergétique des convertisseurs sont ainsi centrales lorsque l'on parle d'efficacité énergétique.

## I.6 Les unités d'énergie et de puissance

Un autre point fondamental, pour quiconque aspire à une bonne culture énergétique, est l'assimilation des unités. Même si le Système International n'en officialise qu'une seule, le Joule, il en existe beaucoup d'autres. On va également s'intéresser à la puissance -très liée à l'énergie-, en regardant ses unités.

### I.6.1 Les unités d'énergie

#### I.6.1.1 Le joule (J)

C'est l'unité reconnue par le Système International (SI). C'est une très petite quantité d'énergie, puisque cela ne permet -par exemple- que de soulever une pomme d'un mètre, ou

encore de réchauffer 1L d'air de 1°C. C'est pourquoi on va plutôt employer ses multiples, que sont le kilo-Joule (kJ, 1 000J), le méga-Joule (MJ, 1 000 000J), le giga-Joule (GJ, 1 milliard de Joules), voire même me tera-Joule (1000 milliards de Joules).

Le Joule correspond également à l'énergie consommée par un dispositif appelant 1 Watt, pendant une seconde.

#### **I.6.1.2 La calorie (cal)**

Une calorie est l'équivalent de 4.18 J. C'est la quantité d'énergie qu'il faut pour réchauffer un gramme d'eau de 1°C. En nutrition, on parle maladroitement de calories. En réalité, il est question de kilo-calories (kcal), soit 4180 J.

$$1 \text{ cal}=4.18 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal}=4180 \text{ J}$$

#### **I.6.1.3 Le Watt.heure (W.h)**

C'est l'énergie consommée par un dispositif appelant 1W, pendant une heure. En pratique, on utilise très souvent son multiple le kilo-Watt heure. C'est le cas notamment d'EDF, qui décompte vos consommations avec cette unité.

$$1 \text{ W.h}=3600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kW.h}=3600 \text{ kJ}$$

#### **I.6.1.4 La Thermie**

On l'utilise surtout dans le monde du chauffage ; elle est l'équivalent d'un million de calories.

$$1 \text{ thermie}=4.18 \text{ MJ}$$

#### **I.6.1.5 L'électron-Volt (eV)**

C'est une unité extrêmement faible, principalement utilisée en physique des particules.

$$1 \text{ eV}=1.6.10^{-19} \text{ J} (0.00000000000000000016 \text{ J})$$

### I.6.1.6 La British thermal unit (BTU)

C'est la quantité d'énergie requise pour élever de 1°F une livre (anglaise) d'eau.

1 BTU=1060 J (cette valeur peut varier légèrement d'une source à l'autre).

**Notez** qu'il existe d'autres unités (par exemple le erg, le Pascal.mètre cube, le litre atmosphère, ...), mais leur utilisation demeure très marginale.

## I.6.2 Les unités de puissance

### I.6.2.1 Le Watt (W)

C'est l'unité officielle du SI. 1W correspond à une énergie de 1J développée en 1 seconde. C'est la puissance qu'il faut développer pour « tirer » une charge de 1N, à la vitesse de 1 mètre par seconde. On utilise également ses multiples et sous-multiples (mW, W, kW, MW, GW, TW, etc...).

### I.6.2.2 Le cheval-vapeur (cv, hp en anglais)

Cette unité est surtout de rigueur dans le monde de l'automobile. La puissance des moteurs est en effet toujours exprimée en cv.

$$1\text{cv}=736\text{W}$$

$$120\text{cv}=88.3\text{kW (voiture courante)}$$

## I.6.3 Énergie ou puissance ?

Afin de saisir au mieux la notion d'énergie, il est capital de parfaitement la différencier de la puissance. Or, beaucoup de personnes font l'amalgame entre ces deux termes. A la question « Combien d'énergie consomme cette lampe chaque jour ? », il est fréquent d'entendre comme réponse « 60 Watt ». Or, le Watt renvoi à la notion de puissance.

Finalement, la puissance correspond à une quantité d'énergie consommée pendant un temps donné. L'unité la plus connue, le Watt, représente une consommation d'un Joule pour chaque seconde qui passe. Ainsi, pour reprendre notre exemple précédent, une lampe qui requiert une puissance de 60W va « avaler » 60 Joules par seconde.

Si l'on suppose maintenant que cette même lampe reste allumée 6 heures par jour, on peut facilement déterminer la quantité d'énergie consommée sur une journée.

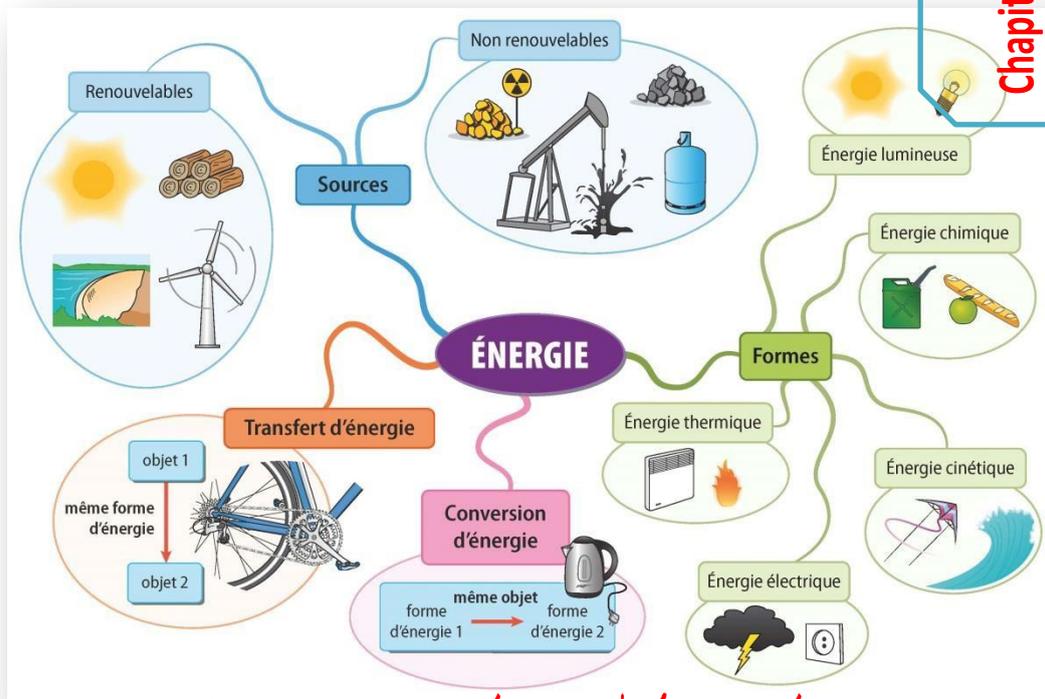
- Énergie consommée/j = Puissance (en Watt) x Temps (en seconde)
- Énergie consommée/j = 60 x (6 heures x 60 minutes x 60 secondes)
- Énergie consommée/j = 1 296 000J

Chaque jour, la lampe va consommer 1296kJ (kilo-Joule = 1000J). Si l'on pousse le calcul sur l'année, en multipliant simplement par 365, on arrive à une valeur de 473MJ (Méga-Joule = 1 000 000J).

L'unité de l'énergie dans le Système International est le Joule<sup>1</sup> [J]. Les factures d'électricité sont quantifiées en kilowattheure [kWh] ; pour les carburants, on parle plutôt de tonnes équivalent pétrole [tep]. Dans le tableau ci-dessous, quelques unités et leurs équivalences sont présentées.

nom	unité	équivalence
Énergie mécanique	J	1 J = 1 N.m
Énergie électrique	J	1J = 1V.1A.1s = 1V.6,2.10 <sup>18</sup> électrons
électron-volt (particule)	eV	1 eV = 1,6.10 <sup>-19</sup> J
Unités de chaleur : calorie british thermal unit quadrillon BTU (US)	Cal BTU quadBTU	1 cal = 4,18 J 1 BTU = 1050 J 1 quadBTU = 10 <sup>15</sup> BTU
kilowattheure	kWh	1 kWh = 3600 000 J = 3,6.10 <sup>6</sup> J = 3,6 MJ
térawattheure	TWh	1 TWh = 10 <sup>12</sup> Wh = 10 <sup>9</sup> kWh
tonne équivalent pétrole	tep	1 tep ≈ 11 600 kWh ≈ 41,7 GJ
baril (159 l ou 140 kg)		1 baril ≈ 1700 kWh

Tableau I.2 : L'énergie, unités et équivalence B. Multon



# La conversion d'énergie électromécanique

## II.1 Introduction

La conversion d'énergie est l'art de produire de l'énergie sous une forme donnée à partir d'une énergie se présentant sous une autre forme. Il peut s'agir de produire de l'électricité à partir du vent ou à partir de panneaux photovoltaïques ; ou encore de produire de la chaleur, du mouvement, de la lumière, des rayons X, de l'électricité... à partir d'électricité.

## II.2 Les Diverses sources d'Énergie

Toutes les sources d'énergie dont les hommes disposent proviennent du Soleil et de la Terre, Une source d'énergie est dite primaire si on la trouve telle quelle dans la nature.

### II.2.1 Sources d'énergie Non Renouvelables

Ces sources disparaîtront un jour car leurs stocks sur la Terre sont limités

#### II.2.1.1 Les Sources Fossiles

Les sources fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont les matières premières que l'on trouve sous terre. Elles sont issues de la décomposition de matières organiques il y a des millions d'années (voir figure)

**II.2.1.2 Le charbon** : il fait fonctionner beaucoup de centrales électriques.

**II.2.1.3 Le gaz** : on le trouve souvent dans les gisements de pétrole. Il est utilisé comme carburant, comme combustible dans certaines centrales électriques.

**II.2.1.4 Le pétrole** : il est transformé en carburant (essence, kérosène), en fioul ... dans les raffineries de pétrole. Il est aussi utilisé pour la fabrication de matières plastiques. Il sert à faire fonctionner des centrales électriques.

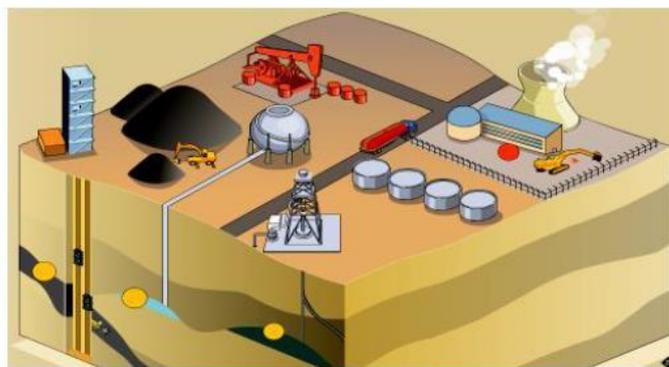


Figure II.1 : Sources d'énergie Non Renouvelables

## II.2.2 Les Sources Fissiles

La fission de minéraux radioactifs (formés **d'atomes que l'on peut « casser »** : fission), de l'énergie peut être libérée sous forme de chaleur.

**L'uranium** : cet élément sert de combustible aux réacteurs des centrales nucléaires de fission.

### II.2.2.1 Sources d'énergie Renouvelables

Elles dépendent d'éléments que la nature renouvelle en permanence. Elles sont inépuisables à notre échelle (plusieurs milliers d'années). Tant que la Terre existera, il y aura toujours du vent, du soleil, du bois, de l'eau, de la chaleur terrestre

II.2.2.2 **Le vent** : il fait tourner des éoliennes.

II.2.2.3 **Le soleil** : Il chauffe l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournit de l'électricité grâce à des photopiles ou des centrales solaires.

II.2.2.4 **La biomasse** : le bois sert traditionnellement de combustible. Les déchets d'êtres vivants (plantes, animaux, ...) servent à obtenir des gaz.

II.2.2.5 **L'eau** : elle fait tourner les turbines des centrales hydroélectriques (barrages).

II.2.2.6 **La géothermie** : elle utilise la chaleur du sous-sol pour chauffer directement de l'eau ou fournir de l'électricité.

## II.3 Chaînes de Puissance Electromécanique

On peut décrire un système par ses fonctions génériques, parmi lesquelles se retrouvent « convertir et transmettre la puissance » au cœur de la chaîne de puissance (ou chaîne d'énergie).

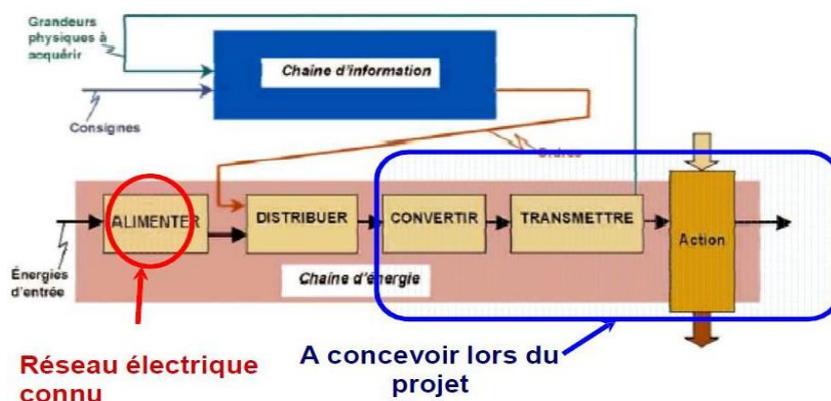


Figure II.2 : La chaîne de puissance

### II.3.1 Notion de puissance :

La puissance définit la quantité de travail effectué par unité de temps (par seconde) ou autrement dit le débit d'énergie. **1 Watt = 1 Joule / 1 seconde = 1 J/s ou J . s<sup>-1</sup>**

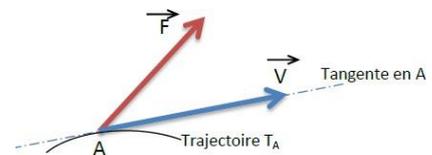
Autre unité usuelle : le cheval (cv) W 736cv 1W

### II.3.2 Puissance développée par une force :

La puissance instantanée  $P$  développée par une force dont le point d'application  $A$  se déplace à la vitesse sur sa trajectoire  $TA$  est égale au produit scalaire de par.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} = F \times V \times \cos\theta$$

$$P \text{ en [Watt] ; } F \text{ en [N] ; } V \text{ en [m.s}^{-1}\text{]}$$



### II.3.3 Puissance développée par un couple :

La puissance développée par un couple  $C$  se déplaçant à la vitesse angulaire  $\omega$  est égale au produit de  $C$  par  $\omega$

$$P = C \times \omega$$

$P$  : puissance en [W] ;  $C$  : couple en [Nm] ;  $\omega$  : vitesse de rotation en [rad.s<sup>-1</sup>]

La fréquence de rotation  $N$  est souvent exprimée en tour par minute. Il faut la convertir en radian par seconde pour la rendre exploitable dans les calculs grâce à la relation suivante :

$$\omega = (2\pi / 60) \times N$$

### II.3.4 Notion de rendement :

Le rendement (éta) d'une machine est égal au rapport de l'énergie restituée sur l'énergie fournie ou reçue.

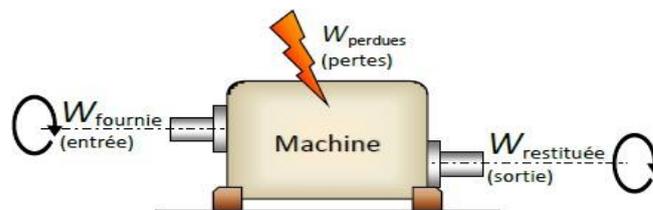


Figure II.3 : Représentation des énergies d'une machines

**Remarque :** l'énergie perdue peut l'être sous forme de chaleur, de frottement, etc

$$\eta = \frac{W_s}{W_e} = \frac{W_e - W_p}{W_e} = 1 - \frac{W_p}{W_e}$$

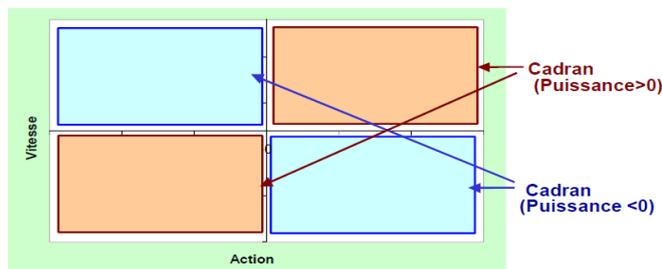
$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - P_p}{P_e} = 1 - \frac{P_p}{P_e}$$

Cela marche aussi avec les puissances :

Le plan de puissance est un outil descriptif de la puissance émise, transmise ou reçue par un système électromécanique. Il se présente sous la forme d'un graphique (Action Vitesse) où l'Action est un effort (N) ou un couple (N.m) et la Vitesse est linéaire (m/s) ou de rotation (rad/s). On peut remarquer que le produit (Action x Vitesse) est homogène à une puissance :

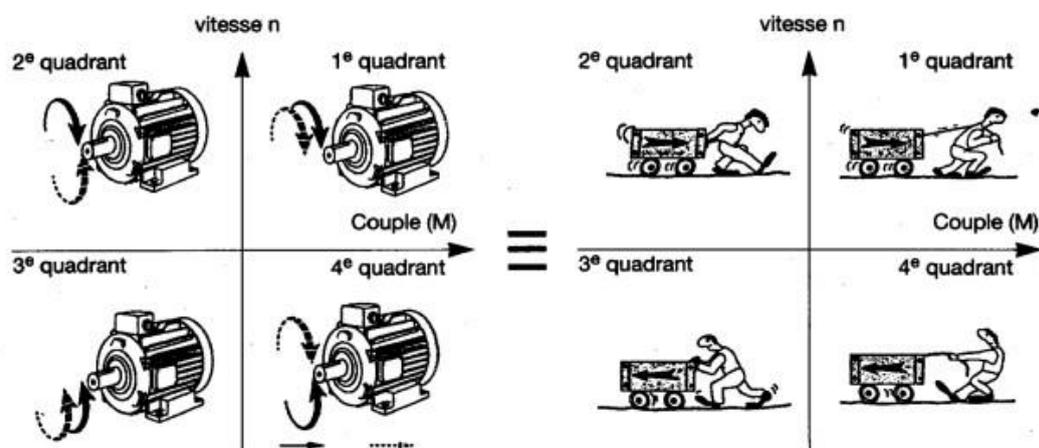
**Puissance = Action x Vitesse**

La figure ci-dessous représente un plan de puissance type. On remarque sur ce graphique que pour deux combinaisons du couple (Action, Vitesse) le système est moteur (Puissance > 0), et que pour deux autres combinaisons le système joue le rôle de frein (Puissance < 0).



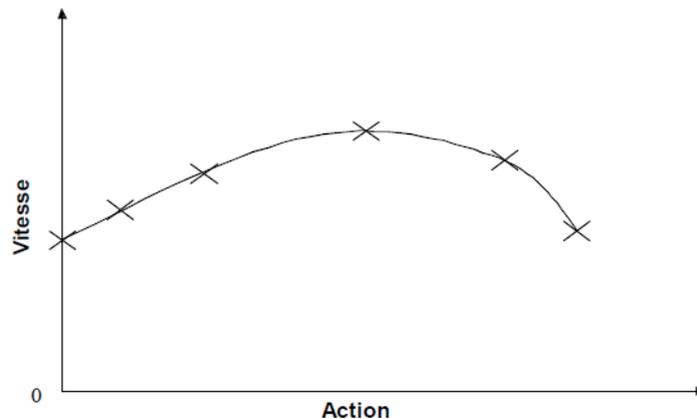
**Figure II.4 :** Représente les combinaisons du couple d'un moteur

De façon plus imagière, voici les modes de fonctionnement en fonction des cadrans :



**Figure II.5 :** Les modes de fonctionnements d'une machine

Il est donc possible de tracer des courbes de puissance d'un système dans son plan de puissance (d'où son nom bien sûr !). Dans la suite du cours, nous nous placerons dans le 1er cadran.



**Figure II.6** : courbe de puissance d'un système

Durant l'utilisation d'un mécanisme, il existe plusieurs temps appelés **points de fonctionnement**. Chaque point de fonctionnement est défini par une valeur en Action et une valeur en Vitesse. Chaque point de fonctionnement possède ainsi sa valeur de puissance. Sur la Figure 2, ces points sont représentés par des croix. L'ensemble des points de fonctionnement forme une courbe de fonctionnement.

Il existe généralement au minimum 3 points de fonctionnement qui correspondent :

- Au démarrage du système : vitesse nulle
- Pendant le fonctionnement normal
- Quand le système fonctionne à vide (sans la charge) : vitesse maximale

Pour un moteur, on appelle charge, le dispositif mécanique qui impose les caractéristiques 'Vitesse, Action'. (Exemple. Pour un ascenseur, c'est la vitesse de déplacement souhaitée qui impose la fréquence de rotation, et la masse à déplacer qui impose le couple).

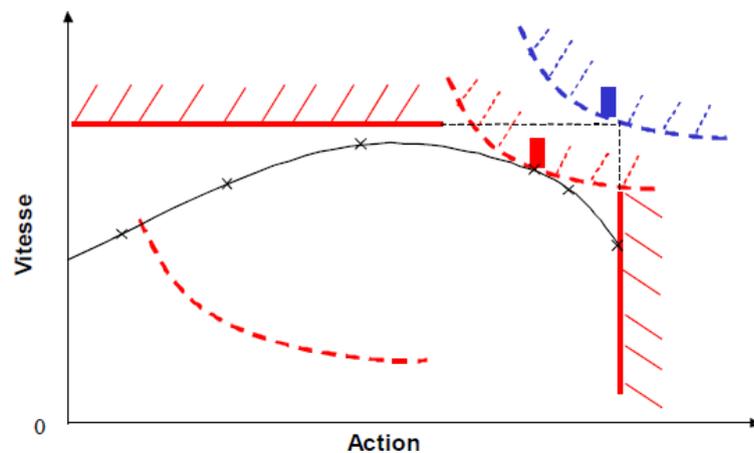
#### II.4 Caractéristiques du plan de puissance

Pour une puissance donnée, il existe un ensemble de points de puissance identique mais en différentes positions dans le plan puissance, ces points forment des courbes d'isopuissance.

Leur équation est donc  $Vitesse = Puissance / Action$ . Ces courbes sont représentées en pointillés sur la figure suivante.

Il existe sur un plan de puissance quelques valeurs remarquables représentées sur la Figure suivante :

- la vitesse maximale : le trait horizontal,
- L'action maximale : le trait vertical,
- La courbe de puissance maximale : tangente au point de fonctionnement maximum,
- La courbe de puissance apparente : tangente au point virtuel de coordonnées (Action maximale, Vitesse maximale).



**Figure II.7 :** Caractéristique du plan de puissance

Le plan de puissance est un outil de vérification. Il permet de valider graphiquement qu'un organe ne demande pas plus d'énergie que le système peut en apporter, ou trouver la puissance nécessaire en fonction de la charge.

Ainsi, pour valider le choix d'un moteur, il est possible d'exprimer la puissance de sortie en fonction de la puissance en entrée du mécanisme, grâce au travail précédent autour du schéma bloc (cf Figure II.6). Le plan de puissance obtenu peut alors être comparé à celui du moteur donné par le constructeur. L'étape finale consiste alors à choisir un moteur dont les capacités (sa courbe caractéristique dans son plan puissance) sont suffisantes pour couvrir les points de fonctionnement exigés par la puissance de sortie.

## II.5 La production d'énergie électrique

L'énergie électrique est un cas particulier car c'est une source d'énergie secondaire. Elle est transportée par les lignes électriques du lieu de production au lieu de consommation.

Source primaire d'énergie	Exemple d'utilisation	Principe de fonctionnement	Énergie permettant de produire l'électricité					
<b>Charbon, gaz, pétrole</b> 	<b>Centrales thermiques classiques</b> 	La combustion du charbon, du gaz ou du pétrole transforme l'eau en vapeur sous pression envoyée vers la turbine.	<b>ENERGIE THERMIQUE CLASSIQUE</b> <table border="1"> <tr> <td><u>avantages</u></td> <td><u>inconvénients</u></td> </tr> <tr> <td>Réponse rapide à une demande importante.</td> <td>Produit des gaz à effet de serre.</td> </tr> </table>		<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>	Réponse rapide à une demande importante.	Produit des gaz à effet de serre.
<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>							
Réponse rapide à une demande importante.	Produit des gaz à effet de serre.							
<b>Uranium</b> 	<b>Centrales thermiques nucléaires</b> 	L'énergie libérée par les atomes d'uranium permet la transformation de l'eau en vapeur qui entraîne la turbine.	<b>ENERGIE NUCLEAIRE</b> <table border="1"> <tr> <td><u>avantages</u></td> <td><u>inconvénients</u></td> </tr> <tr> <td>Pas de gaz à effet de serre. Compétitif (= faible coût de production).</td> <td>Gestion des déchets. Risque technologique. Coût de construction important.</td> </tr> </table>		<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>	Pas de gaz à effet de serre. Compétitif (= faible coût de production).	Gestion des déchets. Risque technologique. Coût de construction important.
<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>							
Pas de gaz à effet de serre. Compétitif (= faible coût de production).	Gestion des déchets. Risque technologique. Coût de construction important.							
<b>Soleil</b> 	<b>Panneaux solaires</b> 	L'énergie renouvelable photovoltaïque permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques.	<b>ENERGIE SOLAIRE</b> <table border="1"> <tr> <td><u>avantages</u></td> <td><u>inconvénients</u></td> </tr> <tr> <td>Energie gratuite. Energie renouvelable. Energie préservant l'environnement.</td> <td>Investissement de départ. Nécessite l'appoint d'une autre source d'énergie. Performances irrégulières qui dépendent de l'environnement.</td> </tr> </table>		<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>	Energie gratuite. Energie renouvelable. Energie préservant l'environnement.	Investissement de départ. Nécessite l'appoint d'une autre source d'énergie. Performances irrégulières qui dépendent de l'environnement.
<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>							
Energie gratuite. Energie renouvelable. Energie préservant l'environnement.	Investissement de départ. Nécessite l'appoint d'une autre source d'énergie. Performances irrégulières qui dépendent de l'environnement.							
<b>Eau</b> 	<b>Centrales hydrauliques</b> 	L'eau accumulée derrière un barrage est dirigée vers les turbines par des tuyaux appelés conduites forcées.	<b>ENERGIE HYDRAULIQUE</b> <table border="1"> <tr> <td><u>avantages</u></td> <td><u>inconvénients</u></td> </tr> <tr> <td>Pas de gaz à effet de serre. Utilisable rapidement.</td> <td>Tous les sites rentables sont déjà exploités.</td> </tr> </table>		<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>	Pas de gaz à effet de serre. Utilisable rapidement.	Tous les sites rentables sont déjà exploités.
<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>							
Pas de gaz à effet de serre. Utilisable rapidement.	Tous les sites rentables sont déjà exploités.							
<b>Vent</b> 	<b>Centrales éoliennes</b> 	Le vent fait tourner les pales, correctement orientées, de l'éolienne.	<b>ENERGIE EOLIENNE</b> <table border="1"> <tr> <td><u>avantages</u></td> <td><u>inconvénients</u></td> </tr> <tr> <td>Pas de gaz à effet de serre.</td> <td>Pas toujours disponible.</td> </tr> </table>		<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>	Pas de gaz à effet de serre.	Pas toujours disponible.
<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>							
Pas de gaz à effet de serre.	Pas toujours disponible.							

Tableau II.1 : les formes d'énergies

Les formes d'énergie peuvent se transformer l'une en l'autre. La chaîne énergétique désigne l'ensemble des conversions d'énergie qui ont lieu. Une partie de l'énergie est utilisée, une autre partie est dissipée (énergie thermique perdue sous forme de chaleur).

**Exemples :**

- **Un feu de bois** consiste en la conversion par combustion d'une source d'énergie primaire : la biomasse en énergie lumineuse et en énergie thermique.
- **Un moteur électrique** convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique (mouvement) et thermique.
- **Une éolienne** convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (mouvement) puis en énergie électrique.
- **Les panneaux photovoltaïques** convertissent l'énergie solaire en énergie électrique.

**II.5.1 Centrale électrique**

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. La production d'électricité y est assurée par la conversion en énergie électrique d'une énergie primaire qui peut être soit mécanique (force du vent, force de l'eau des rivières, des marées...), soit chimique (réactions d'oxydoréduction avec des combustibles, fossiles ou non tels que la biomasse), soit nucléaire, soit solaire...

Ces énergies primaires peuvent être renouvelables (biomasse) ou quasiment inépuisables (énergie solaire) ou au contraire peuvent constituer des ressources dont la disponibilité est limitée dans le temps (combustibles fossiles).

**II.5.1.1 Historique**

En 1878, en Europe, une centrale hydraulique de 7 kW est construite à Saint-Moritz<sup>1</sup>.

La première centrale électrique des États-Unis, la Pearl Street Station, a été mise en service le 4 septembre 1882 par Thomas Edison<sup>2</sup> dans le bas-Manhattan, ce qui a permis de faire fonctionner l'éclairage électrique des bureaux du New York Times et d'autres bâtiments aux alentours de Wall Street. La centrale ne délivrant que du courant continu ne pouvait alimenter efficacement qu'un petit secteur géographique. Le premier générateur, baptisé « Jumbo », était bien moins efficace que ceux d'aujourd'hui : il avait un rendement de 3 à 4 % de l'énergie du charbon utilisé. Quelques années plus tard, Edison a cependant vu l'intérêt de la cogénération en utilisant l'excédent de chaleur produit par le générateur électrique pour chauffer les bâtiments.

Début XIX<sup>e</sup> siècle toutes les centrales thermiques modernes emploient des machines à surchauffe à multiple expansions, compound en général et d'une puissance de 1 000 à 10 000 chevaux. A partir de 1 500 ou 2 000 HP (horsepower), on emploie dans un assez grand nombre de cas la triple expansion, quelquefois la quadruple expansion. L'emplacement des centrales est décidé par la proximité des combustibles (voie ferrée) et par la proximité du cours d'eau nécessaires à l'alimentation des chaudières et aux travaux de refroidissement du condenseur. L'encombrement des machines, et le poids élevé de leurs divers organes, deviennent un véritable gêne pour les grosses centrales, situées dans des emplacements souvent réduits et où le terrain est cher. C'est ce qui a amené peu à l'emploi des turbines à vapeur. Dans un premier temps les deux systèmes coexistent<sup>3</sup>.

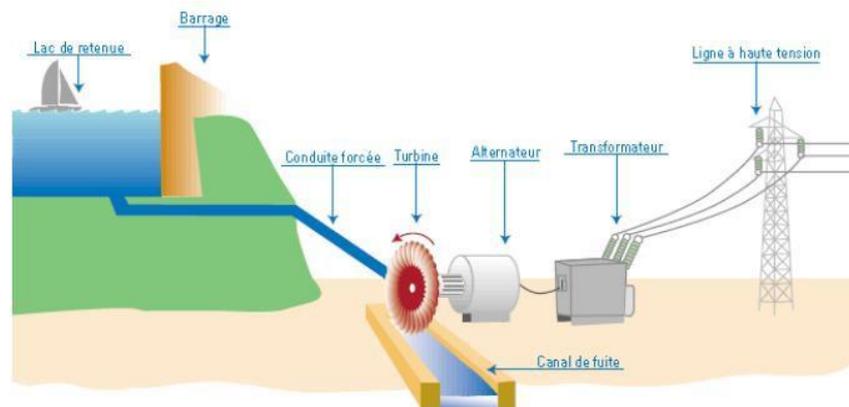
L'invention de la turbine à vapeur moderne en 1884 par Sir Charles Parsons rend possible l'électricité bon marché et abondante, et a révolutionné le transport maritime et la marine de guerre. Elle prend le pas sur la machine à vapeur qui est détrônée. Le premier modèle était relié à une dynamo qui générait 7,5 kW (10 ch) d'électricité<sup>4</sup>. La démonstration complète de l'efficacité de la turbine est réalisée à Erbfeld en Allemagne, des unités de 1 000 kW. Sa licence est brevetée et sa turbine est améliorée peu de temps après par George Westinghouse. La puissance des turbines Parsons s'est également avérée être extensible à grande échelle. Parsons a eu la satisfaction de voir son invention adoptée par toutes les grandes centrales de ce monde, et la taille des génératrices a augmenté depuis la première de 7,5 kW jusqu'à des unités de 50 000 kW de capacité. Pendant la vie de Parson, la capacité de production d'une unité a été multipliée par environ 10 000<sup>5</sup>. La base théorique et scientifique déjà très élaborée explique l'évolution de la turbine, contrairement à ce qui s'était passé pour la machine à vapeur<sup>6</sup>.

## II.5.2 Énergie hydroélectrique

### II.5.2.1 Introduction

Le soleil évapore chaque année en moyenne **980 litres** d'eau de chaque mètre carré de la surface terrestre, au total **500,000 km<sup>3</sup>**. (Voir schéma ci-dessous qui représente le cycle d'eau dans la nature). Environ **22%** de l'énergie solaire de radiation arrivant à la terre est nécessaire pour assurer le cycle d'eau. Presque **20%** de l'eau évaporée pleut sur la terre, où la majorité s'évapore encore. A peu près **40,000 km<sup>3</sup>** s'écoule de nouveau vers les océans par le biais des rivières et eaux souterraines. Ceci est égal à plus de 1 milliard de litres par seconde. Techniquement, l'énergie de ce flux peut être utilisée.

Près de  $160 \text{ EJ} = 160 \times 10^{18} \text{ J}$  est stockées dans les rivières et les mers, ce qui est équivalent à environ **40%** du besoin globale de l'énergie. Environ  $\frac{1}{4}$  de cette énergie pourrait être techniquement exploité, de sorte qu'à peu près **10%** du besoin globale de l'énergie pourrait être fourni sans émissions de dioxyde de carbone par l'énergie hydroélectrique.



**Figure II.7 :** Centrale Hydroélectrique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement (par exemple avec un moulin à eau) ou converti sous forme d'électricité (avec une centrale hydroélectrique).

### II.5.2.2 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique : De l'eau à l'électricité

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. On note que :

La puissance disponible résulte de la réunion de deux facteurs : la hauteur de la chute et le débit. (Voir schéma suivant)

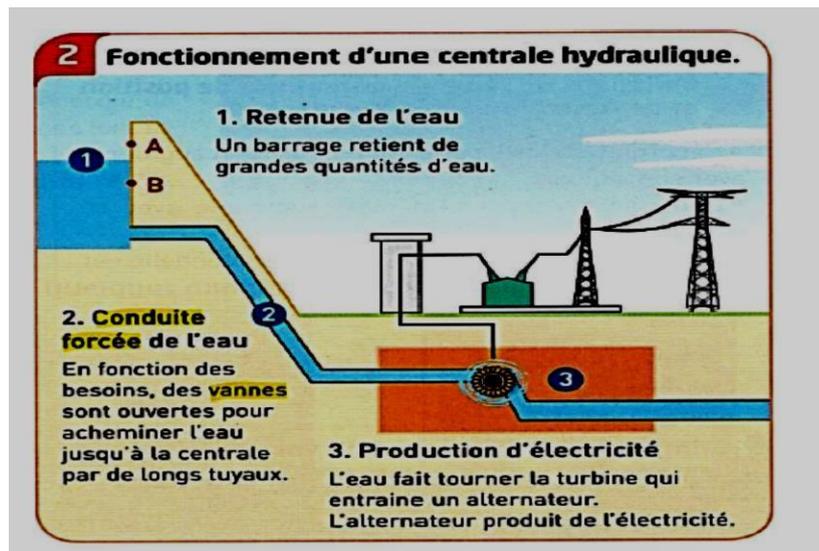


Figure II.8 : fonctionnement d'une centrale hydraulique

### II.5.2.3 Les différents types d'aménagements hydrauliques

Il existe une grande diversité d'aménagements hydroélectriques en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique. On distingue **plusieurs techniques** :

#### II.5.2.3.1 Centrale de lac

Elle est surtout présente dans les sites de haute montagne. Elle est caractérisée par un débit faible et un dénivelé (pente) très fort avec une chute supérieure à 300 m.

#### II.5.2.3.2 Centrale d'écluse ou de moyenne chute

Elle est surtout installée en moyenne montagne et dans les régions de bas-relief. Elle est caractérisée par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.

#### II.5.2.3.3 Centrale au fil de l'eau ou de basse chute

Elle est implantée sur le cours de grands fleuves ou des rivières. Elle est caractérisée par un débit très fort et pente faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel.

#### II.5.2.3.4 La Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP)

Elle fonctionne en circuit fermé à partir de deux réservoirs à des altitudes différentes : *Aux heures de forte consommation*, l'eau du bassin supérieur situé en amont est turbinée puis recueillie dans une retenue en aval. *Aux heures de faible consommation*, l'eau est pompée et remontée dans la retenue en amont.

#### II.5.2.4 La centrale marémotrice

Elle fonctionne de la même manière qu'une centrale de basse chute mais en utilisant la force du courant créée par l'amplitude des marées.

## II.6 Energie Eolien

### II.6.1 Introduction

L'utilisation de la force du vent pour remplacer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. Les premières éoliennes remontent à la Perse ancienne. Certains pays européens, depuis le Moyen Âge, ont largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (**moulins hollandais**) ou des **éoliennes dites américaines** que ce soit pour broyaient les céréales pour les transformer en farine ou pomper l'eau.

### II.6.2 Définition

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement. Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté.

**II.6.3 L'éolienne**, aussi nommée aérogénérateur, est une machine qui permet de transformer l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Lorsque l'on ne produit qu'une énergie mécanique, on parlera seulement d'éolienne de pompage d'eau.



**Figure II.9 :** Présentation d'un aérogénérateur

## II.6.2 Différents types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles par leur axe de rotation : l'axe horizontal ou l'axe vertical.

### II.6.2.1 Axe horizontal :

Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien

### II.6.2.1 Axe vertical :

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traîner différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.

## II.6.3 Fonctionnement des éoliennes

Les principaux éléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal sont : le mât ou tour, le rotor, la nacelle et le générateur. **Un mât** permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour : permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

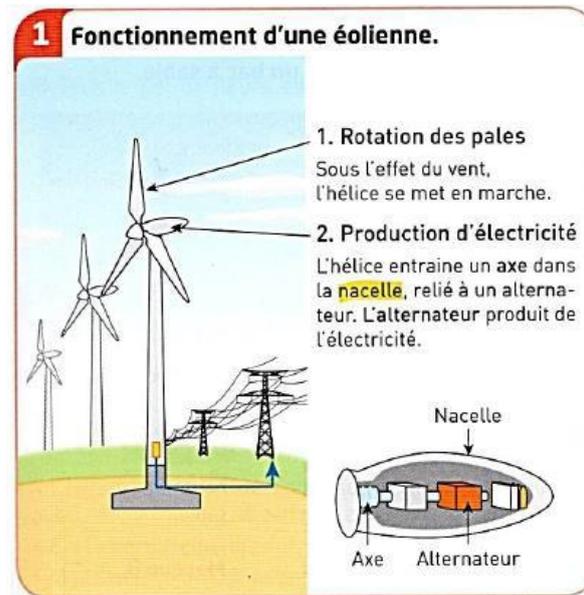


Figure II.10 : Fonctionnement d'une éolienne

## II.7 Énergie Solaire

### II.7.1 Introduction

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques.

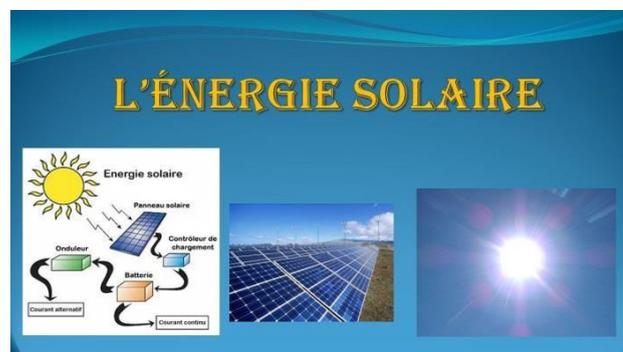


Figure II.11 : Représentation de l'énergie solaire

L'énergie solaire reçue par la Terre représente 10000 fois la consommation énergétique mondiale. Elle pourrait répondre à tous les besoins en énergie, mais demande de gros

investissements. L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère.

Le rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière  $C$  ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche de l'infrarouge

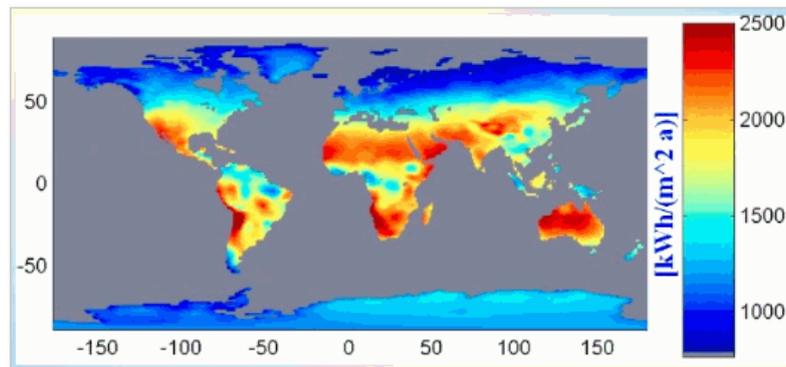


Figure II.12 Rayonnement solaire dans le monde

## II.7.2 Principe de fonctionnement

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à notre système de chauffage solaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un liquide qui récupère cette chaleur.

Il existe 2 Types de chauffage solaire : le plancher direct et le système à accumulation.

- ✚ **Le plancher direct** : le liquide passe et se chauffe dans les capteurs et ensuite circule directement dans le plancher chauffant basse température.
- ✚ **Système à accumulation** : l'eau chaude de chauffage est stockée dans un ballon puis renvoyée sur le réseau de radiateurs.

**Remarque :** Ces deux systèmes permettent également la production d'eau chaude.

Le schéma suivant illustre le principe de fonctionnement du chauffage solaire

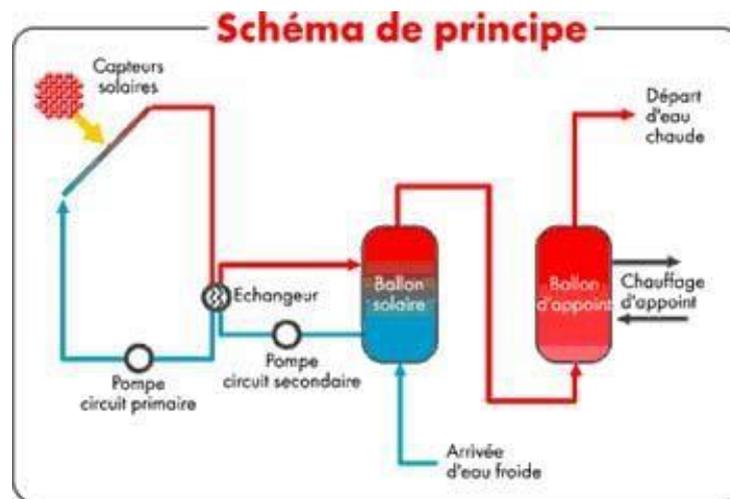


Figure II.13 : le principe de fonctionnement du chauffage solaire

Les centrales solaires utilisent le **rayonnement solaire** pour produire de l'électricité. Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable. Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

### II.7.3 Les centrales solaires:

Les centrales solaires utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable.

Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

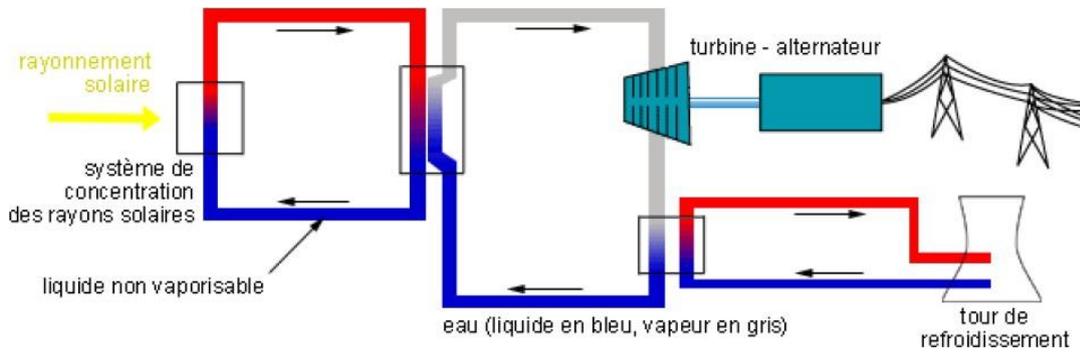
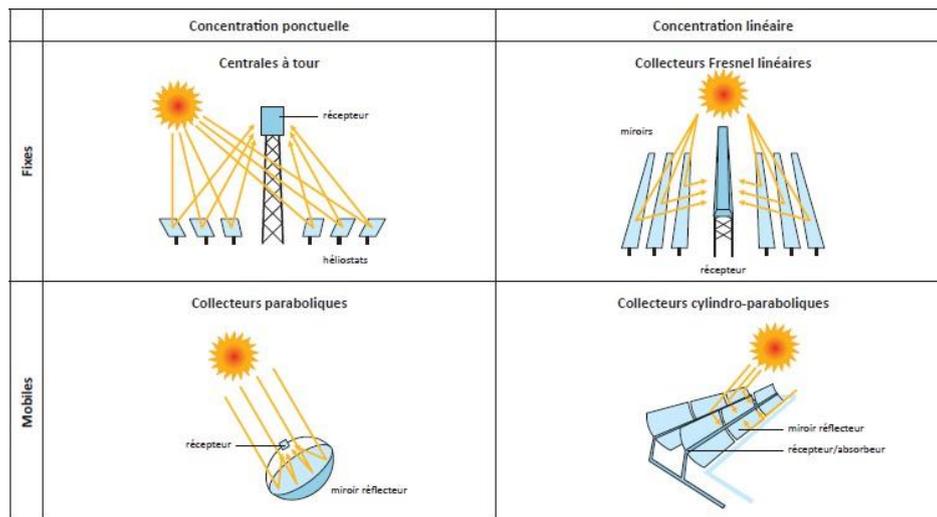


Figure II.14 Principe des centrales Solaires

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

La figure 15 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.



source : AIE

Figure II.15 : Les systèmes de concentrations

## II.8 Énergie Nucléaire

### II.8.1 Historique

L'Humanité maîtrise l'énergie nucléaire depuis moins de 100 ans. Mais les recherches sur la radioactivité ont commencé à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Tu as sans doute entendu parler de Pierre et Marie Curie. Et aussi, d'Albert Einstein. Ces grands scientifiques ont permis de mieux comprendre le phénomène de la radioactivité. L'énergie nucléaire a d'abord été utilisée dans le cadre militaire. En 1945, les États-Unis mettent fin à la Seconde Guerre mondiale en lâchant deux bombes atomiques sur les villes japonaises d'Hiroshima et Nagasaki : une tragédie humaine sans précédent. A partir des années 1950, l'énergie nucléaire est utilisée pour produire de l'électricité. En 1986, un très grave accident se produit dans la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine (ex- URSS). Le grand public réalise alors le danger potentiel que représente cette énergie. En 2011, l'accident qui touche la centrale de Fukushima, au Japon, marque aussi les esprits.

### II.8.2 Introduction

Selon le contexte d'usage, le terme d'**énergie nucléaire** recouvre plusieurs sens différents :

- Dans le langage courant, l'énergie nucléaire correspond aux usages civils et militaires de l'énergie libérée lors des réactions de fission nucléaire des noyaux atomiques au sein d'un réacteur nucléaire ou lors d'une explosion atomique (dans le cas d'une bombe thermonucléaire il existe aussi des réactions de fusion nucléaire).
- Dans le domaine des sciences de la Terre et de l'Univers, l'énergie nucléaire est l'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire au sein des étoiles - par exemple le Soleil - ainsi qu'à la radioactivité naturelle, la principale source d'énergie du volcanisme de la Terre<sup>1,2</sup>.
- En physique des particules, l'énergie nucléaire est l'énergie associée à la force de cohésion des nucléons, la force nucléaire forte (protons et neutrons) au sein du noyau des atomes. Les transformations du noyau libérant cette énergie sont appelées réactions nucléaires. La force nucléaire faible régit les réactions entre particules et neutrinos.

### II.8.3 Les Mines d'Uranium

Les roches qui contiennent du minerai d'uranium sont extraites du sous-sol terrestre dans des mines d'uranium. Mais pour pouvoir être utilisé comme source d'énergie, l'uranium doit d'abord être transformé en usine, pour en faire une sorte de concentré appelé "yellowcake" ("gâteau jaune" en anglais).

### II.8.4 Les centrales Nucléaires

Ce concentré d'uranium, est acheminé dans les centrales. Il est alors enfermé, de manière hermétique, dans le réacteur nucléaire. C'est celui-ci qui va provoquer la désintégration des noyaux atomiques d'uranium. Ce processus dégage une formidable énergie sous forme de chaleur, qui sert à faire bouillir de l'eau. La vapeur fait tourner une turbine qui produit de l'électricité.



Figure II.16 centrale Nucléaire

D'ailleurs, la fumée que l'on voit s'élever au-dessus des grandes cheminées rondes des centrales... ce n'est pas du CO<sub>2</sub> ou de la pollution, mais justement de la vapeur d'eau. La seule atteinte directe à l'environnement, c'est que l'eau qui sert à refroidir les installations retourne chaude dans la nature. Cela peut perturber les végétaux et les animaux.

Aujourd'hui, il existe 440 centrales nucléaires réparties dans 30 pays. Ensemble, elles produisent environ 10% de l'énergie consommée dans le monde. Les pays qui produisent le plus d'énergie nucléaire sont les États-Unis, avec 99 réacteurs, et la France, qui en compte 58. En Chine, 25 centrales nucléaires sont en cours de construction. Notons au passage que, depuis sa découverte, le principe de la radioactivité a trouvé des applications très utiles dans la médecine ! Les rayons X, par exemple, permettent de faire des photographies des parties dures à l'intérieur du corps.

## II.8.5 Le fonctionnement d'une centrale nucléaire

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur, chaleur qui transforme alors de l'eau en vapeur et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité.

### 1. Le circuit primaire

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, à 320 °C. L'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire.

### 2. Le circuit secondaire

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes très haute tension.

### 3. Le circuit de refroidissement

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. En bord de rivière, l'eau de ce 3<sup>e</sup> circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérants.

## II.9 La production d'énergie électrique par géothermie

La production d'énergie mécanique ou électrique s'obtient en faisant passer la vapeur issue du sous-sol au travers d'une turbine à vapeur. Ces applications concernent essentiellement

les champs géothermiques moyenne et haute énergie, c'est-à-dire les contextes géologiques où la température est comprise entre 90 °C et 250 °C.

- ✚ Centrale de production électrique conventionnelle de Bouillante
- ✚ Centrale pilote de production électrique non-conventionnelle



Figure II.17 Principe de la géothermie

À l'intérieur du réservoir géothermal, il y a de l'eau sous forme liquide ou vapeur ou encore un mélange de ces deux phases. Un forage géothermique pourra produire de la vapeur seule (dite vapeur sèche) ou un mélange des deux phases liquide et vapeur (on parle alors de vapeur humide).

L'état du fluide dans le réservoir dépend de la pression et de la température. Leur valeur déterminera également son potentiel énergétique (enthalpie). Selon la nature et les propriétés du fluide arrivant en surface, on utilise différents systèmes pour produire de l'électricité.

- Cycle indirect à condensation
- Cycle direct à contre-pression
- Cycle direct à condensation
- Cycle à vaporisation
- Cycle à fluide binaire – cycle de Rankine (*ORC*)

En surface, le fluide géothermal est amené dans un échangeur de chaleur où il cède une partie de son énergie à un fluide volatil (alcane, HCFC...), appelé **fluide de travail**, présentant la propriété de se vaporiser à basse température. Le fluide de travail ainsi vaporisé est ensuite détendu dans une turbine couplée à un alternateur, puis condensé au contact du circuit d'eau de refroidissement d'un condenseur. Le liquide obtenu est alors renvoyé à l'échangeur de chaleur, au

moyen d'une pompe, pour effectuer un nouveau cycle (vaporisation, détente, condensation, pressurisation). Le fluide de travail évolue donc en circuit fermé.

Le fluide géothermal est, quant à lui, rejeté en surface ou réinjecté dans sa formation d'origine après son passage dans l'échangeur de chaleur et épuisement de son contenu énergétique.

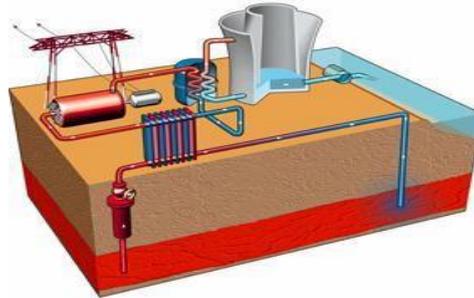


Figure II.18 Principe de Production EE par Géothermie

Cette technologie est commercialement développée depuis le début des années 1980 et tend à se développer. Elle concerne des fluides géothermaux dont la température se situe entre 90 °C et 150 °C. Elle est limitée à de petites puissances (de l'ordre de quelques centaines de kW à quelques MW) et est particulièrement adaptée à l'alimentation en électricité de zones isolées éloignées des réseaux de distribution d'énergie électrique telles que les zones insulaires ou les zones de montagne.

## II.10 Pile à combustible

### II.10.1 Introduction

L'énergie abondante et non polluante, capable de faire rouler les véhicules et faire fonctionner tout appareil électrique, est certainement représentée de nos jours par l'hydrogène et son vecteur: la pile à combustible. Ce dossier présente l'évolution de la technologie de la pile à combustible, les enjeux, son principe de fonctionnement et ses utilisations possibles, allant de la batterie de téléphone portable jusqu'au prototype automobile .

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.

L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ».

Les piles à combustible se différencient d'abord par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons  $H^+$ ) de l'anode à la cathode, soit basique (anions  $OH^-$ ,  $O^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ) en sens contraire.

## II.10.2 Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne sur le monde inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes : le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions. (Voir le schéma) Le combustible à base d'hydrogène  $H_2$  est amené sur l'anode.  $H_2$  va se transformer en ions  $H^+$  et libérer des électrons qui sont captés par l'anode. Les ions  $H^+$  arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions  $O_2$  constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau. C'est le transfert des ions  $H^+$  et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu à partir de l'hydrogène. Cependant cette tension ne dépasse pas 0,7 V par cellule ; il faut donc utiliser un grand nombre de cellules en série pour obtenir la tension requise. Le courant

électrique produit par la pile est continu ; il est donc souvent nécessaire de placer en aval de la pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en un courant alternatif, notamment lorsque l'installation est utilisée pour fournir du courant domestique.

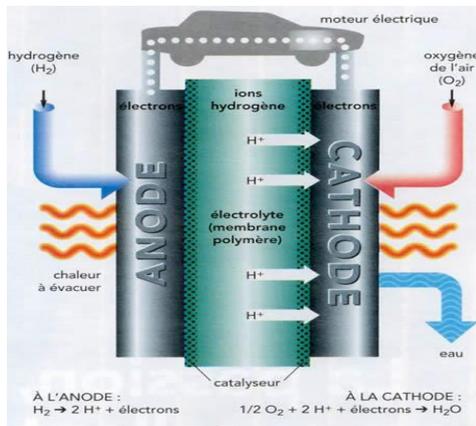


Figure II.19 La pile à combustible

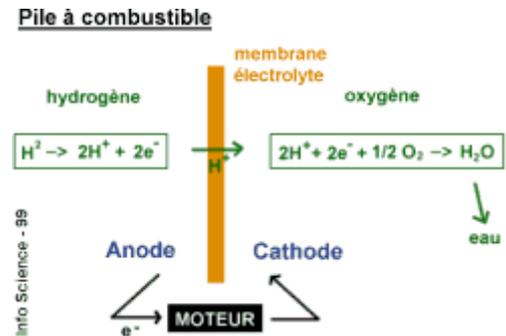


Figure II.20 principe de La pile à combustible

La réaction est déclenchée à l'aide d'un catalyseur. Il s'agit en général d'une fine couche de platine disposée sur les électrodes(anode et cathode) Un des points critique, relatif à la construction de la pile, est de pouvoir contrôler de manière optimale l'approvisionnement et l'évacuation des composés alimentant chaque cellule (généralement de l'hydrogène et de l'air), ou devant être évacués (généralement de l'eau).

### II.10.3 Une pile, un système

Comme un moteur, une pile à combustible a besoin d'être entourée de composants et de sous-systèmes pour se transformer en générateur d'électricité.

Il lui faut:

- un réservoir
- un compresseur d'air
- un sous-système de refroidissement
- un convertisseur
- un contrôle commande avec ses capteurs, vannes...

Toutefois le fonctionnement reste très silencieux.

## II.10.4 Le combustible et son stockage

Le combustible le plus simple à utiliser est l'hydrogène. C'est également lui qui permet d'obtenir les densités de courant les plus élevées. Sa combustion ne produit que de l'eau (sous forme liquide ou de vapeur). C'est un carburant réactif et il est abondant. Cependant il est inflammable dans l'air ou en présence d'oxygène. De plus, incolore et inodore, c'est un gaz à manipuler avec précaution. Autre inconvénient: il occupe beaucoup de place, ce qui s'avère problématique dans le cas de piles équipant des véhicules.

Les recherches sur la pile portent donc également sur les réservoirs de stockage d'hydrogène que l'on veut plus sûrs, plus légers et plus compacts. Une des solutions consiste donc à utiliser un hydrocarbure ou un alcool comme le méthanol. Dans le domaine du stockage les avancées technologiques progressent de jours en jours.

## II.10.5 Le rendement

Le rendement d'une pile à combustible varie selon le type de pile et peut être supérieur à 50%. À titre de comparaison, le rendement d'un moteur à combustion interne est en moyenne de 15%. De plus, l'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de vapeur d'eau (donc de chaleur) qui est utilisée à des fins de cogénération: chauffage, eau chaude...

## II.10.6 Classification des convertisseurs électromécaniques

### II.10.6.1 Introduction:

Bien que de nouvelles solutions émergent (piézo-électriques, magnétostrictives, voire électrostatiques dans les très faibles dimensions), les actionneurs électromagnétiques occupent toujours, et probablement encore pour longtemps, une place prépondérante dans la conversion – réversible – électromécanique d'énergie.

Au-delà des actionneurs dits conventionnels, bénéficiant d'une maturité technologique et d'une diffusion scientifique importante (machines à courant continu à collecteur, synchrones à rotor bobiné, asynchrones à cage d'écureuil...), une très grande diversité d'actionneurs, dits non conventionnels, coexistent et se développent toujours. Ils répondent généralement à des exigences particulières et ne sont pas standardisés. Leur fonctionnement est également souvent méconnu et leur potentiel encore plus mystérieux. On les trouve notamment dans les applications de très grande diffusion (souvent de faible puissance : inférieure au kilowatt) telles

que l'électroménager grand public, la domotique, l'automobile ou les jouets et dans celles exigeant de hautes performances.

Leur évolution a été accélérée grâce aux formidables développements de l'électronique de Puissance (notamment ses possibilités de « haute fréquence ») et de l'électronique micro programmable.

Une classification de ces différents actionneurs paraît, au premier abord, risquée, sinon impossible, d'autant que leurs topologies sont très nombreuses et très variées. Néanmoins, après une analyse approfondie de différents actionneurs existants ou faisant l'objet de travaux de recherche, la mise en avant de critères fondamentaux topologiques, liés notamment au type de bobinage de puissance (d'alimentation), au mode d'alimentation, au mouvement généré, s'est révélée possible.

Bien sûr, tous les mouvements, linéaires ou autres, seront considérés ici

#### **II.10.6.2 Critères simples:**

Un actionneur électromagnétique est un système capable de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique via une étape intermédiaire magnétique. Cette particularité lui confère un caractère réversible fondamental, à l'inverse de certains actionneurs thermodynamiques ou hydrauliques.

*Nota : cette définition exclut les freins à courant de Foucault qui convertissent de l'énergie mécanique en énergie magnétique puis thermique mais qui sont dissipatifs et non réversibles.*

Dans un actionneur électrique, la conversion d'énergie est fondée, d'une façon générale, sur l'interaction d'au moins deux sources de champ magnétique : un bobinage de puissance, car obtenu

partir d'un circuit électrique, véhiculant l'énergie électrique destinée à la conversion, et une source magnétique d'excitation qui, si toutefois elle est alimentée, n'absorbe que ses propres pertes.

D'autre part, la conversion électromécanique nécessite d'avoir au moins deux parties en mouvement relatif entre lesquelles la zone d'interface est appelée entrefer. L'une des deux, fixe par rapport au référentiel choisi, est dite le stator, l'autre est dite le rotor ou le mobile suivant le type de déplacement généré.

*Nota : dans le cas particulier des actionneurs magnétohydrodynamiques (MHD), l'une des deux parties est fluide. On se situe ici à la limite de la notion d'actionneur électromécanique.*

*Cependant, l'analogie de comportement avec les actionneurs, à partie mobile solide, nous amène à les citer.*

À chaque stade de la conversion, des pertes apparaissent : pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques. La conversion électromécanique du point de vue énergétique est schématisée sur la figure 1. Les critères fondamentaux de classification (figure 2) peuvent se définir à partir de la figure 1. Ces critères sont liés aux sources magnétiques (de création de champ magnétique), à l'architecture mécanique et, enfin, à l'alimentation électrique. Nous dégagerons également des critères composés correspondant à des combinaisons des critères fondamentaux.

### II.10.6.3 Sources d'excitation

Rappelons que la source d'excitation magnétique est le système qui permet de créer une variation du flux dans le bobinage de puissance en fonction de la position mécanique. On peut en dégager les différentes caractéristiques

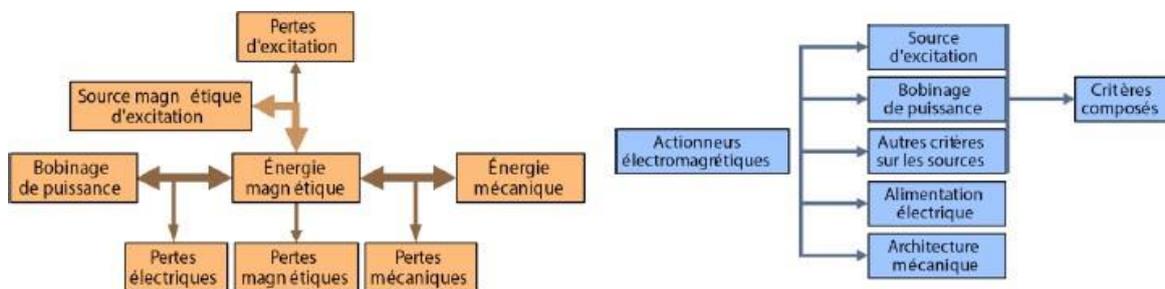


Figure II.21: Conversion d'énergie dans les actionneurs

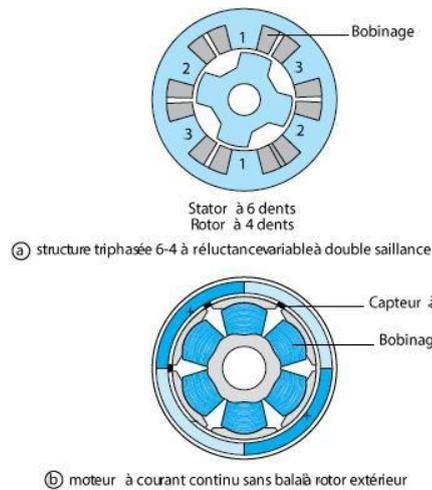


Figure II.22: Structures à couplage polaire  
à pôles saillants

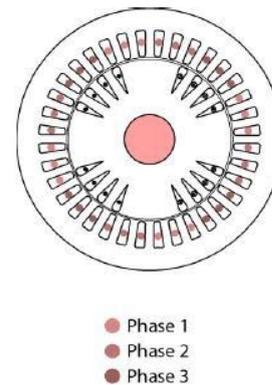


Figure II.23: Coupe d'une machine synchrone triphasée à rotor lisse bobiné (4 pôles, 3 encoches par pôle et par phase)

**Courant** : le champ magnétique d'excitation est de type courant lorsqu'il utilise les courants électriques. Les excitations de type courant regroupent les excitations bobinées classiques (figure 4), les excitations par supraconducteurs, les excitations par courants induits (dans un bobinage en court-circuit ou dans un matériau massif conducteur, figure 5).

#### II.10.6.4 Nature dissipative de l'excitation:

On peut également ajouter un critère supplémentaire quant à la nature fondamentalement dissipative ou non de la source d'excitation.

- Excitation non dissipative : une source non dissipative est une source pouvant fonctionner sans créer de pertes. On trouve de telles excitations dans les machines à aimants permanents (figure 3b), les machines à réluctance variable (figure 3a) et les machines supraconductrices.
- Excitation dissipative : une source dissipative se trouve dans les machines à excitation bobinée (figure 4) non supraconductrice, ainsi que dans les machines à hystérésis.

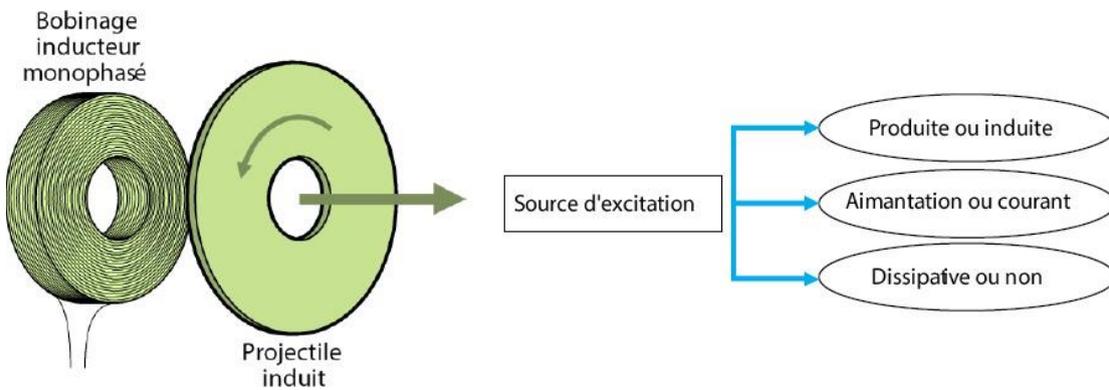


Figure II.24. Lanceur électromagnétique à induction Figure II.25. Types de sources magnétiques d'excitation

### II.10.6.5 Cycle de conversion lié au bobinage monophasé:

On peut définir pour un bobinage de puissance un rapport caractérisant le nombre de cycles de conversion effectués pour réaliser un déplacement rotatif ou linéaire dans un sens donné. Ce rapport est donné par  $te/tm$  où  $te$  est la période électrique fondamentale d'alimentation liée aux sources électriques et  $tm$  est la période mécanique, c'est-à-dire le temps entre deux changements de sens de déplacement rotatif ou linéaire. On distingue ainsi les bobinages non cycliques des bobinages dits cycliques.

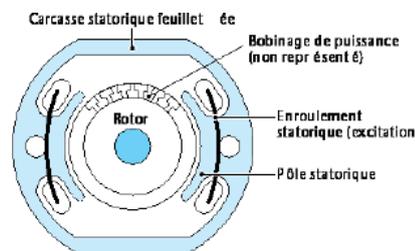


Figure II.26 : Moteurs à collecteur mécanique a excitation bobinée

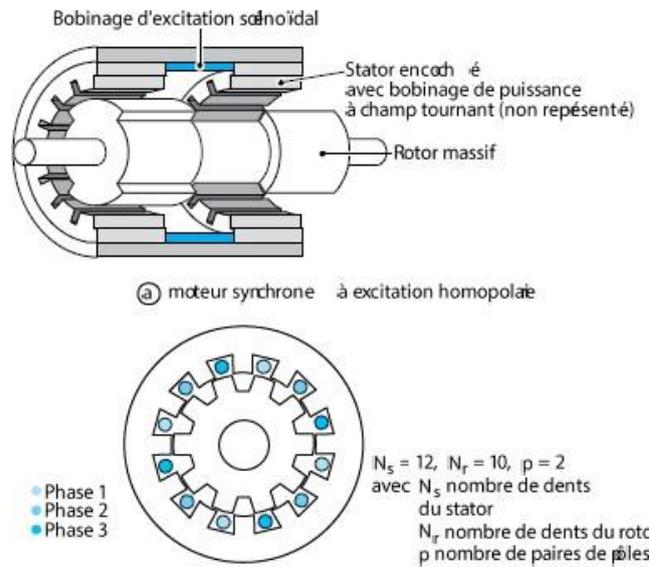


Figure II.27 : Actionneurs à phases réparties

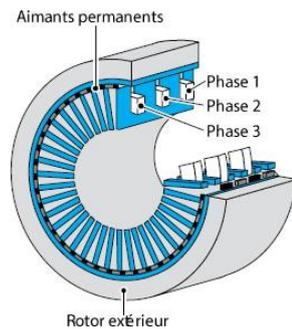


Figure II.28 : moteur à flux transverse

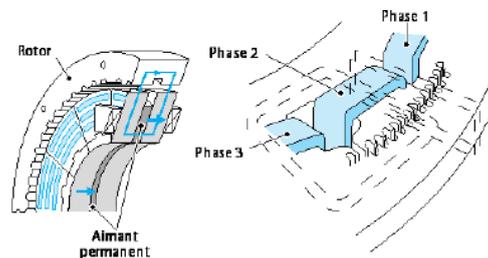


Figure II.29: moteur hybride à rotor extérieur

**II.10.6.5.1 Bobinages non cycliques :** ce sont des bobinages de puissance dont le rapport  $t_e / t_m$  est proche de 1.

La période électrique est à peu près égale à la période mécanique. Il n'y a dans cette catégorie que les actionneurs monophasés à débattement limité : vibreurs, haut-parleurs et électroaimants entre autres.

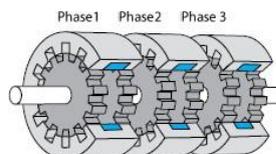


Figure II.30: moteur à reluctance variable

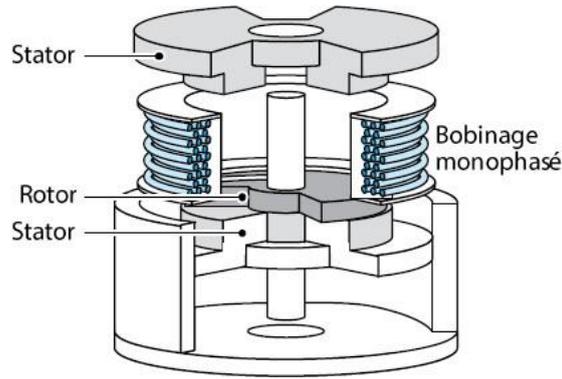


Figure II.31 : Moteur rotatif a reluctance variable

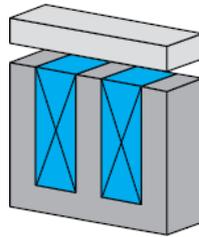


Figure.II.32 : Electroaimant

**II.10.6.5.2 Bobinages dits cycliques :** dans ce type de bobinage, la période électrique est largement inférieure à la période mécanique. Le rapport caractéristique est donc:  $te/tm \ll 1$ .

On retrouve ici tous les moteurs monophasés à débattement illimité, comme le moteur rotatif monophasé à aimant (figure 11). La figure 20 montre un exemple d'actionneur monophasé à réluctance variable à bobinage cyclique dont le fonctionnement est normalement à débattement limité mais qui peut être également rotatif continu à condition d'entraîner une charge inertielle sans frottement sec.

On peut synthétiser les critères sur le bobinage de puissance comme sur la figure. ....

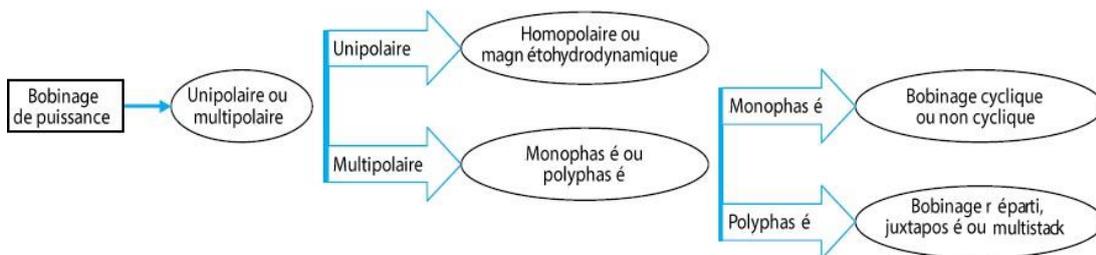
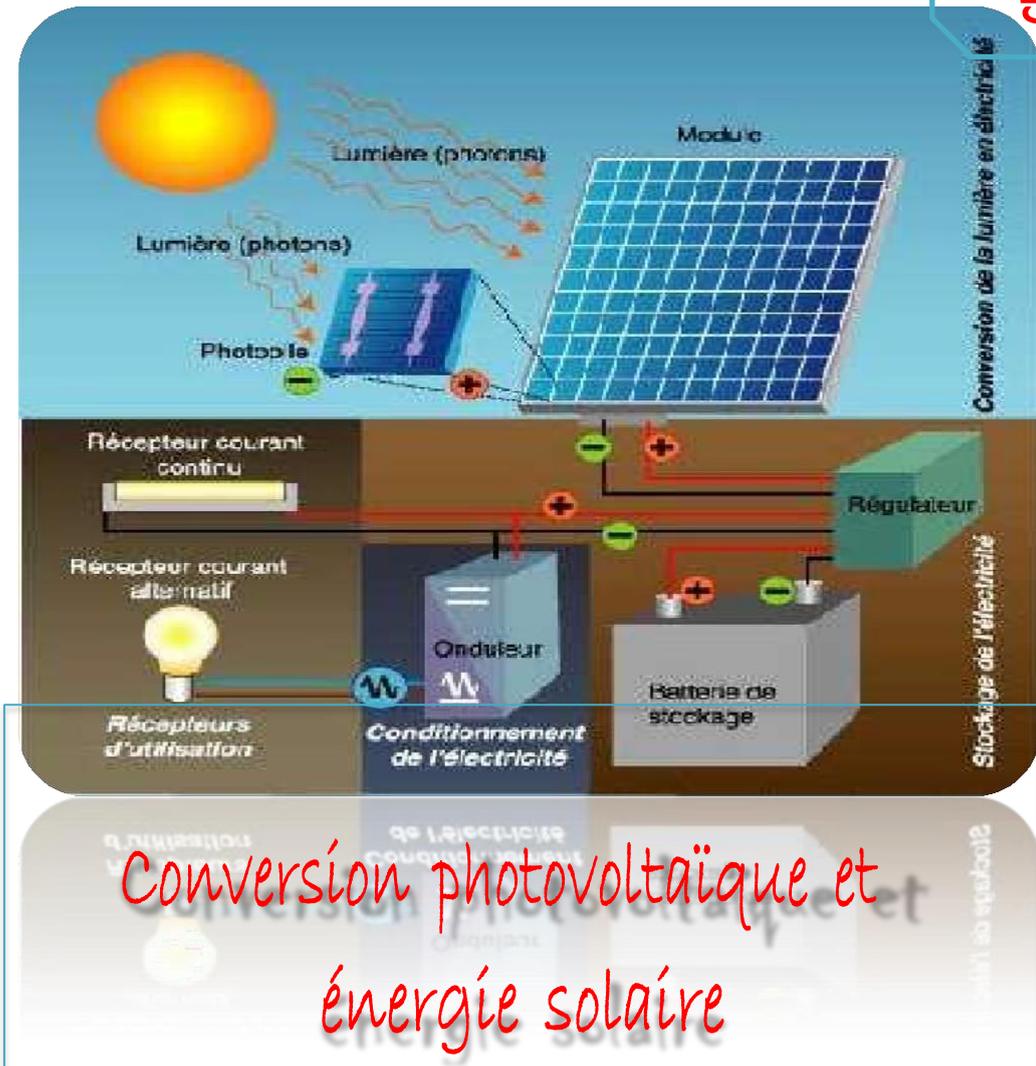


Figure II.33 : Les critères sur les Bobinages

Nous citerons dans ce qui suit **d'autres critères** sur les sources de puissances et d'excitation comme:

- La localisation de la source
- Polarité du champ magnétique d'entrefer
- Trajet du flux d'entrefer
- Source fixe ou mobile

Chapitre 3



### III.1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ». Dans ce chapitre nous allons tout d'abord montrer les principales caractéristiques du spectre solaire, pour présenter ensuite l'idée principale de la conversion photovoltaïque. Pour cela, le principe de la conversion photovoltaïque est rappelé. Ensuite, nous abordons la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. Puis nous énumérons les principaux paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque. Enfin nous terminons ce chapitre par l'état de l'art en technologies photovoltaïque, en passant en revue les différentes filières technologiques pour la fabrication des cellules solaires.

### III.2. Histoire de la lumière solaire

Les premiers à s'intéresser à la lumière solaire sont les gréco-romains mais leurs découvertes sont plus utilitaires que scientifiques. Par exemple, les verres ardents qui permettent d'allumer un feu en concentrant les rayons. A cette époque un conflit est né entre les atomistes qui affirment que la lumière est constituée d'atome qui s'échappe de la matière et les pythagoriciens qui eux certifient que l'œil envoie des rayons qui sondent l'espace.

Nous nous intéresserons plutôt aux principaux scientifiques (dis "modernes" ) qui ont réservé une partie de leur vie à l'étude de la lumière solaire. Nous allons retracer leurs histoires et leurs découvertes.

René Descartes (1596 - 1650), grâce aux travaux de Willbrord Snell, propose une loi de réfraction en 1637 qui est  $n=c/v$  où  $n$  est l'indice de réfraction,  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s) et  $v$  est la vitesse de la lumière dans le milieu étudié. Cependant, un mathématicien persan Ibn Sahl avait déjà fait mention d'une loi de réfraction en 984 sur les miroirs ardents et les lentilles mais ce ne sont que les travaux de l'Européen qui furent retenus plus tard

**Pierre de Fermat** (1601-1665), en 1657, part du fait que la nature agit toujours le plus simplement possible. Grâce à l'indice de réfraction, il énonce que la lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit extrême.

Neuf ans plus tard, **Isaac Newton** (1643-1727) décompose la lumière blanche grâce à un prisme en un spectre de couleurs, sa découverte est révolutionnaire : la couleur est issue du rayonnement solaire et n'est en fait pas dans le verre!

En 1677, **Christiaan Huygens** (1629-1685) évoque la théorie ondulatoire de la lumière, cette dernière serait composée d'ondes et de particules.

Il faudra attendre l'année 1801 pour que **Thomas Young** (1773-1829) confirme les travaux de Huygens: il fait passer de la lumière à travers deux fentes parallèles et la projette sur un écran, la lumière est diffractée et produit des franges d'interférences c'est à dire des alternances de bandes éclairées et non-éclairées, il conçoit la lumière comme une ondulation périodique oscillant à la fois dans l'espace (longueur d'onde  $\lambda$ ) et dans le temps (période T), tout en se propageant à la vitesse c telle que  $\lambda=cT$ .

L'opticien et physicien **Joseph Von Fraunhofer** (1787-1826) crée un tout nouvel objet: un réseau. Il aligne une multitude de fils métalliques très rapprochés qui permettent de reproduire le spectre solaire comme un prisme. Tout comme Newton, il décompose la lumière blanche et découvre le phénomène de renversement des raies en 1814: un atome absorbe ou émet une radiation à une longueur d'onde très précise.

**Albert Einstein** (1879-1955) approfondit les travaux de Newton et découvre que la lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un flux de particules. Il introduit la notion de photon qui est une particule de lumière et de chaleur s'échappant du soleil, son énergie, en J, est calculée grâce à  $\Delta E = h \cdot \nu$  avec h qui est la constante de Plank soit  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s et  $\nu$  est la fréquence du rayonnement monochromatique en Hertz (Hz).

### III.3 Composition du rayonnement solaire

*Le soleil ainsi que son rayonnement ont de multiples caractéristiques.*

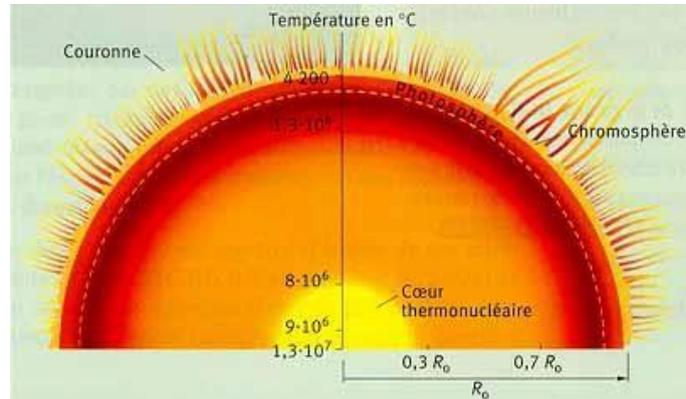


Figure III.1 : le soleil

Le Soleil est l'étoile **centrale** de notre système solaire. D'après la classification astronomique, notre étoile est de type **n a i n** jaune. Elle est composée essentiellement **d'hydrogène** (78,4 % de la masse) et **d'hélium** (19,6 % de la masse), les 2% restant étant composé d'autres éléments chimiques dont les principaux sont l'oxygène et le carbone. Autour de lui gravitent la **Terre**, et **sept autres planètes** (Mercure, Vénus et Mars qui sont comme la Terre des "planètes telluriques", et Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune qui sont des planètes dites "géantes gazeuses") au moins cinq planètes naines (la plus connue étant Pluton), de très nombreux astéroïdes et comètes ainsi qu'une bande de poussière. Le Soleil représente à lui seul **99,86 % de la masse du système solaire** ainsi constitué (Jupiter représentant plus des deux tiers de tout le reste).

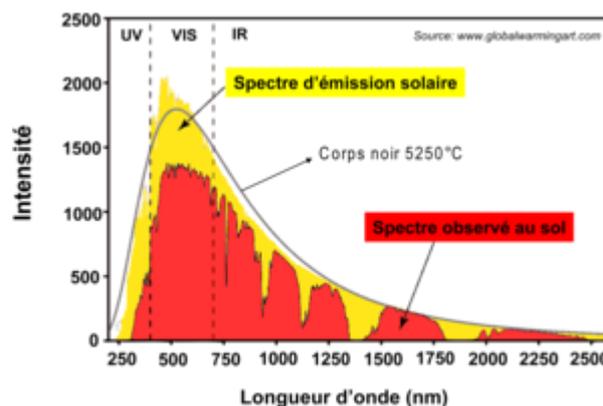


Figure III.2: L'intensité solaire en fonction de la longueur d'ondes

Le Soleil émet un rayonnement de type **électromagnétique**. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ **8 minutes et 19 secondes** à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Ce rayonnement constitue **un spectre continu** allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

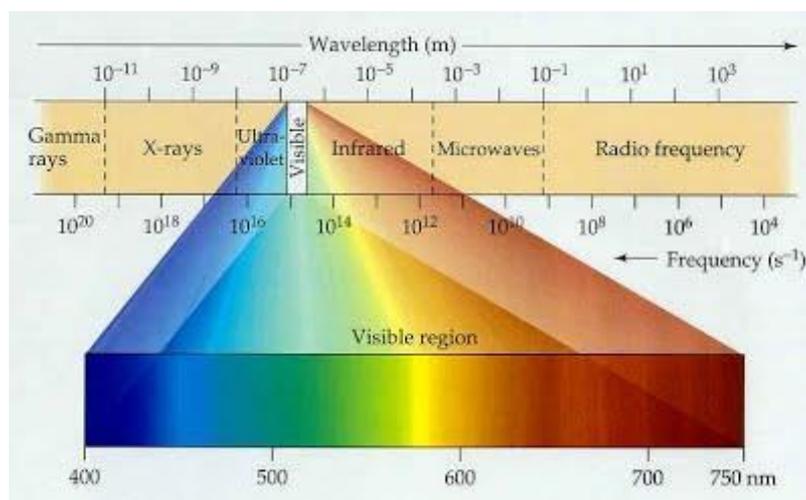


Figure III.3 : Le spectre de fréquences

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de **raies d'absorptions** (voir ci-dessous)

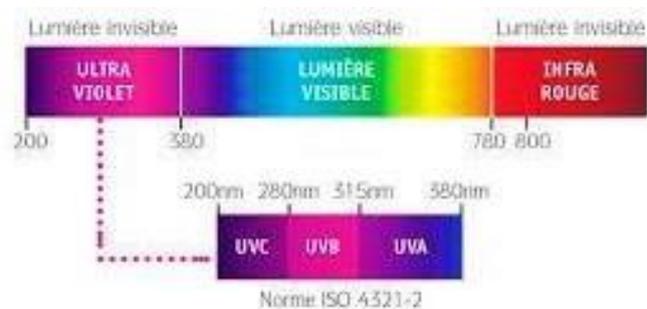


Figure III.4 : Le rayonnement solaire

Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : **5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge**, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

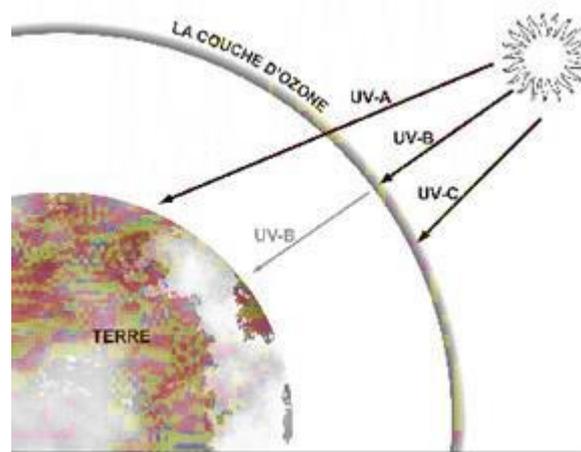


Figure II.5 : **Absorption des rayons ultraviolets**

Le rayonnement **ultra-violet** émis par le Soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les **UV-A** ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315 nanomètres ( $1\text{nm}=1 \times 10^{-9}\text{mètre}$ ), les **UV-B** dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les **UV-C** qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la Terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont soit absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "**quantum d'énergie**" et notée " $\Delta E$ ". L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  (en hertz), dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) est égale à la célérité divisée par  $\nu$ , est exprimée par la relation  $\Delta E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda$ ,  $h$  étant la constante de Planck c'est-à-dire  $6,63 \times 10^{-34}$  Joules par seconde. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie **plus important** que les photons composant le rayonnement infrarouge.

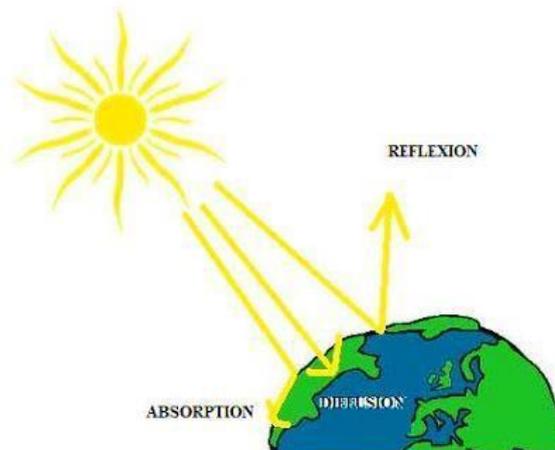


Figure III.6: Phénomènes de rayonnement

L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à  $1\,350 \text{ Watts/m}^2$  (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont **réfléchies, absorbées ou diffusées**, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme **l'épaisseur de l'atmosphère** où l'on se trouve ou encore **la position du Soleil** et sa valeur atteint dans les meilleures conditions  $900$  à  $1000 \text{ Watts/m}^2$ .

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	$> 1 \text{ mm}$	$< 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$	Radio, TV, radars
Infrarouge	$1 \text{ mm à } 0,8 \mu\text{m}$	$3 \times 10^{11} \text{ à } 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	$0,8 \text{ à } 0,4 \mu\text{m}$	$3,7 \times 10^{14} \text{ à } 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	$0,4 \text{ à } 0,05 \mu\text{m}$	$7,5 \times 10^{14} \text{ à } 6 \times 10^{15} \text{ Hz}$	Bronzage, purification de l'eau
Rayons X	$0,05 \mu\text{m à } 10^{-2} \text{ \AA}$	$6. 10^{13} \text{ à } 3. 10^{20} \text{ Hz}$	Radiographie
Rayons gamma	$< 10^{-2} \text{ \AA}$	$> 3. 10^{20} \text{ Hz}$	-

**Tableau III-1** : Principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages [1].

*Nous pouvons aussi remarquer que sans ce rayonnement, la Terre ne serait pas comme elle est actuellement.*

### III.4 Essentiel à la vie humaine

*Le Soleil est essentiel à la vie humaine, sans lui la vie ne serait simplement plus possible.*



Apparence de la Terre lors de l'apparition de la vie ( supposition )

Figure III.7: **Apparition du soleil**

Rappelons que le Soleil est un des **facteurs à l'origine de la vie** sur Terre. En effet, plusieurs facteurs ont permis l'apparition de la vie : notamment le  $\text{CO}_2$  et l'océan, mais aussi le soleil qui a joué un rôle particulier. En effet, il a permis à l'air d'être maintenu constamment **chaud** et donc de **ne pas geler l'océan**. Ce dernier servait de **protection** aux cellules vivantes en évitant que les rayons ultraviolets du soleil détruisent les constructions chimiques des êtres vivants.

Indirectement, cette énorme boule de gaz, d'environ  $6\,000^\circ\text{C}$ , a facilité l'apparition de la vie dans l'eau. Cependant, une certaine faune arrive à vivre sans l'énergie du soleil dans les abysses près des sources hydrothermales des Galapagos (à l'est de l'océan Pacifique). Toutefois, sans le soleil à l'origine, la Terre ne serait pas comme elle est actuellement.

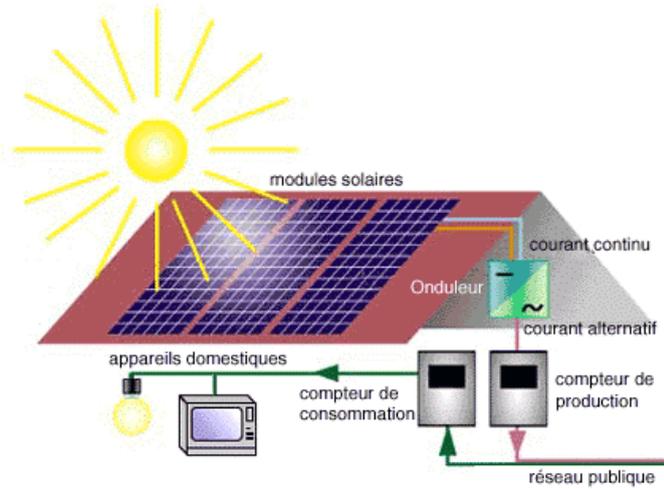


Figure III.8: Système photovoltaïque

Le soleil nous apporte beaucoup de chose notamment de **l'énergie** dont il est la principale source. L'énergie **thermique**, délivrée par le rayonnement solaire (transformation de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium), est obligatoire à la survie, sans elle, le monde ne serait plus qu'un amas de glace. L'homme peut survivre à une ère glaciaire mais sans soleil, le corps humain ne pourrait s'adapter. De plus, l'énergie thermique est utilisée par l'homme qu'il transforme en **électricité** par le biais de panneau photovoltaïque: La lumière frappe le panneau et est convertie en électricité grâce à des modules photovoltaïques.

(Fonctionnement du photovoltaïque ci-dessus et panneau photovoltaïque à droite.)

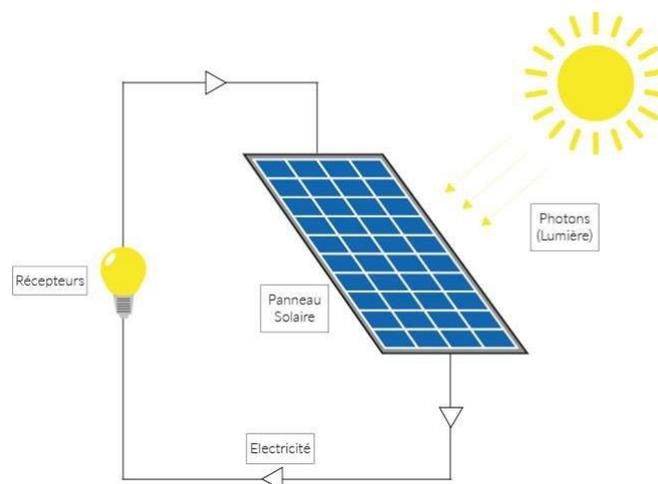


Figure III.9 : Fonctionnement du photovoltaïque

Pour simplifier les choses, voici un petit résumé des étapes qui permettent de produire de l'électricité avec un panneau solaire photovoltaïque :

- ✚ Les **photons** viennent frapper les **cellules photovoltaïques**
- ✚ Les **électrons** se déplacent alors produisant un **courant électrique continu**

Ce courant électrique continu est transformé en **courant alternatif** grâce aux onduleurs

Essayons cependant d'aller un peu plus dans le détail. Le principal composant d'un panneau solaire photovoltaïque est un **module** qui permet de transformer l'énergie du soleil en électricité. Ce procédé est rendu possible par les **cellules photovoltaïques** qui composent le module. Chaque cellule est produite à l'aide d'un **matériau semi-conducteur** appelé le silicium. Ce matériau a un comportement assez spécifique lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire. En effet, la lumière du soleil se compose de **photons** qui vont venir frapper la surface du panneau solaire photovoltaïque. Ils vont ensuite transmettre l'énergie qu'ils comportent aux électrons du matériau semi-conducteur, c'est-à-dire le **silicium**. Les électrons vont alors se mettre en mouvement et ce déplacement produit un **courant électrique continu**. Le système permet ensuite d'additionner les quantités d'électricité produite par les différentes cellules qui composent le panneau solaire photovoltaïque.

Pour information, il est impératif de transformer ce courant électrique continu en **courant alternatif** afin qu'il soit utilisé au sein de votre logement ou bien envoyé sur le réseau de distribution électrique. C'est le rôle de ce qu'on appelle les **onduleurs**, machines indispensables à la génération d'électricité à partir de l'énergie solaire.

L'énergie solaire est **indispensable** à la chaîne alimentaire.

Elle est à l'origine de la **photosynthèse**, qui est une réaction chimique qui se déroule chez les plantes, cette dernière crée de l'énergie sous forme de molécules organiques: les glucides. Ce phénomène a lieu chez les chloroplastes, organites spécifiques des plantes végétales qui sont ensuite consommés par les animaux herbivores puis finalement, eux-mêmes consommés par les animaux carnivores. L'équation de la photosynthèse est :



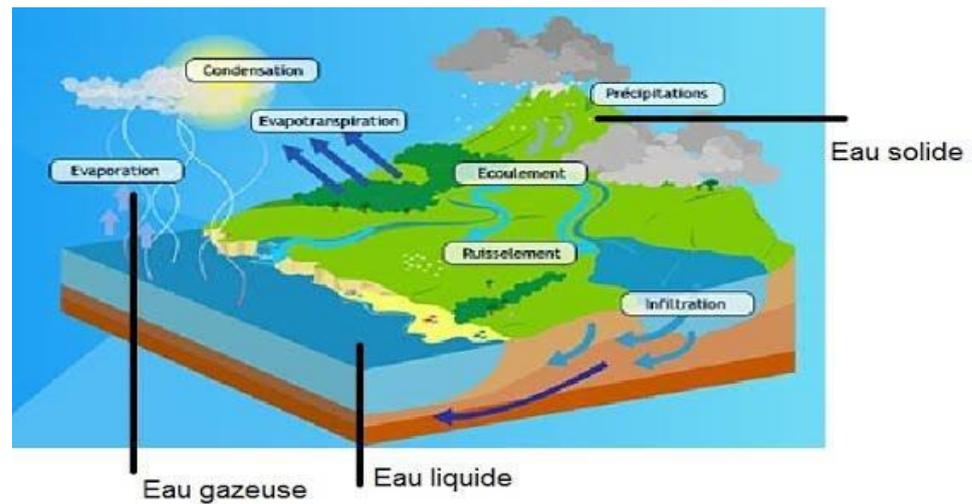


Figure III.10 : Les états de l'eau

L'astre influe aussi sur **l'état de l'eau**. Il diffère selon l'exposition au soleil et il peut prendre **trois formes différentes**: l'état liquide si la température est entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $100^{\circ}\text{C}$ , l'état gazeux si la température est au-dessus de  $100^{\circ}\text{C}$  puis l'état solide lorsque sa température est au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Cependant, la neige est entre deux états : solide et liquide, il faut qu'il fasse suffisamment froid (près de  $-10^{\circ}\text{C}$ ) pour que les gouttelettes d'eau se cristallisent mais la chute de neige dépend surtout des conditions atmosphériques d'où l'importance du degré zéro pour la chute de neige. Sans l'activité solaire, l'eau ne pourrait pas être liquide et donc il n'y aurait pas de **réactions biochimiques**.



Figure III.11 : Présentation de la couche d'ozone

Quand l'activité solaire varie, l'émission d'ultraviolet est énormément changée. Elle a des effets sur la couche d'ozone stratosphérique. En effet, la Terre reçoit plus ou moins d'ultraviolet ce qui conduit à créer moins d'ozone ou, au contraire, en créent encore plus. L'ozone participe à l'effet de serre en absorbant l'infrarouge et entraîne, selon la quantité, une baisse de température ou une augmentation. La température de la stratosphère entraîne des modifications jusque dans la troposphère et de la formation des nuages. Quand l'activité solaire est maximale, l'ozone est plus abandonnant ce qui réchauffe la stratosphère. La variation de la radiation solaire, de l'UV, de la luminosité, du champ magnétique, du vent solaire et donc des rayons cosmiques, sont une des causes de l'évolution de la température dans l'atmosphère terrestre.

*Les rayons du soleil sont indispensables pour l'homme mais sont également une source bienveillante comme une source dangereuse.*

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
		<b>1<sup>ère</sup> génération</b>		
<b>Silicium monocristallin</b>	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
<b>Silicium polycristallin</b>	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
<b>2<sup>ème</sup> génération</b>				
<b>Silicium amorphe</b>	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
<b>Silicium cristallin en couche mince</b>		9,40%	7%	Production industrielle
<b>CIS</b>	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
<b>CdTe</b>	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3<sup>ème</sup> génération</b>				
<b>Cellule organique</b>	5,70%			Au stade de la
<b>Cellule de Grätzel</b>	11%	8,40%		Au stade de la
<b>Cellules multi-jonctions</b>	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

**Tableau III-2 : Les différentes technologies photovoltaïques**

### III.5 Énergie thermique

L'**énergie thermique** est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. L'énergie thermique est une partie de l'énergie interne d'un corps. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques et jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Ils atteignent un équilibre lorsque la température des corps est égale. L'énergie thermique est l'énergie que possède une substance en raison de l'agitation de ses particules (atomes ou molécules).

#### III.5.1 Énergie et équilibre thermiques

L'énergie thermique a tendance à se diffuser uniformément dans l'espace. Ce mécanisme naturel d'équilibre est un des mécanismes énoncés dans le principe zéro de la thermodynamique, qui comprend aussi l'équilibre mécanique (des pressions s'équilibrent), et l'équilibre chimique (les fluides se mélangent).

#### III.5.2 Les mécanismes de répartition de l'énergie thermique se font :

✓ **Par contact direct :**

- La conduction thermique (transfert de l'énergie cinétique des molécules sans échange de matière) ;
- La convection (échange de matière entre fluides : gaz et liquides).

La dissipation d'énergie thermique par contact se produit de façon dissymétrique par rapport au temps, et se fait toujours du corps le plus chaud (celui dont la température est la plus élevée) vers le corps le plus froid. Ce phénomène est formalisé dans le second principe de la thermodynamique et limite les possibilités de transformer de l'énergie en travail. Il a été découvert lors de la réalisation des premiers moteurs.

- ✓ **Par rayonnement :** au travers du vide ou de milieux transparents aux spectres lumineux et Infrarouge : émission de photons, par le phénomène appelé rayonnement du corps noir.

### III.6 Énergie thermique et température

Lors de la mise en contact de deux corps, un échange d'énergie thermique se produit. Le point d'équilibre est atteint lorsque les deux corps ont atteint la même température. La notion d'équilibre est une notion transitive. Si un corps A est en équilibre avec B, et que ce corps B est en équilibre avec un corps C, alors A et C sont aussi en équilibre : A, B et C ont la même température. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, il a été jugé que cette loi, qui semble tenir du simple bon sens, méritait d'être formulée comme le principe zéro de la thermodynamique.

Bien que difficile à définir formellement, la température est une notion utilisée dans la vie courante, car facile à observer. Pour mesurer la température d'un corps, il suffit de le mettre en contact avec un thermomètre (par exemple un thermomètre à alcool), et d'en lire la graduation à l'équilibre thermique.

La capacité thermique massique d'un corps est une valeur définie pour exprimer la quantité d'énergie thermique nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme de ce corps d'un degré Celsius. La capacité thermique massique dépend en général de la composition du corps et de sa température.

### III.7 Moteur à Combustion

#### III.7.1 Définition

Le moteur à combustion interne est une machine thermique qui convertit l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, généralement sous forme d'un mouvement rotatif d'un arbre

#### III.7.2 Historique

- 1700: moteurs à vapeur
- 1860: Moteur de Lenoir (rendement  $\eta \sim 5\%$ )
- 1862 Beau de Rochas définit le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne
- 1867: Moteur de Otto & Langen: ( $\eta \sim 11\%$  et rotation  $< 90$  rpm)
- 1876: Otto invente le moteur à 4 temps à allumage par bougie ( $\eta \sim 14\%$  et rotation  $< 160$  rpm)
- 1880: Moteur deux temps

- 1892: Diesel invente le moteur quatre temps à allumage par compression
- 1957: Wankel invente le moteur à piston rotatif

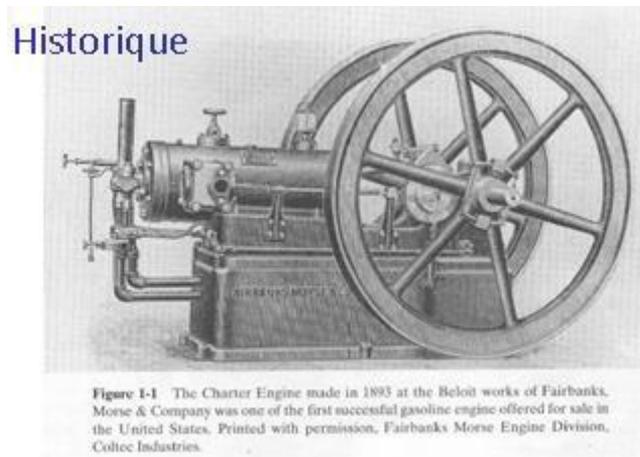


Figure III.12: **Moteur à combustible 1893**

### III.7.3 Classification

- Les moteurs à explosion (à essence):
  - La combustion du mélange air / essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie d'allumage
  - Système d'allumage commandé
  - Le mélange air / essence peut s'effectuer par:
    - Carburateur
    - Injection directe d'essence
  
- Les moteurs à combustion (Diesel)
  - La combustion est déclenchée par l'injection du gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé.
  - Le mélange s'enflamme par auto inflammation, c'est-à-dire spontanément
  
- Les quatre phases de fonctionnement du moteur ont été définies dès 1862 par Beau de Rochas:
  - Admission: aspiration d'air ou de mélange air / essence
  - Compression de l'air ou du mélange
  - Inflammation rapide et détente du piston

- Echappement des gaz brûlés

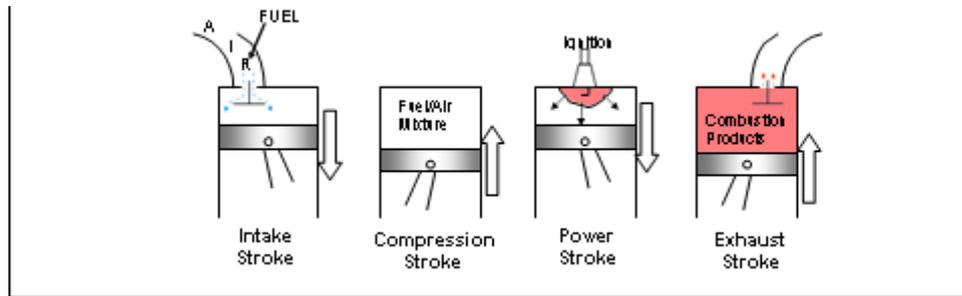


Figure III.13 : Les quatre phases de fonctionnement du moteur

- **Les moteurs à quatre temps** réalisent le cycle en quatre courses de piston et deux tours de vilebrequin
- **Les moteurs à deux temps** réalisent le cycle en deux courses de pistons et un tour de vilebrequin
- **Les moteurs rotatifs**: le mouvement alternatif rectiligne est remplacé par la rotation d'un rotor qui réalise le cycle trois fois par tour

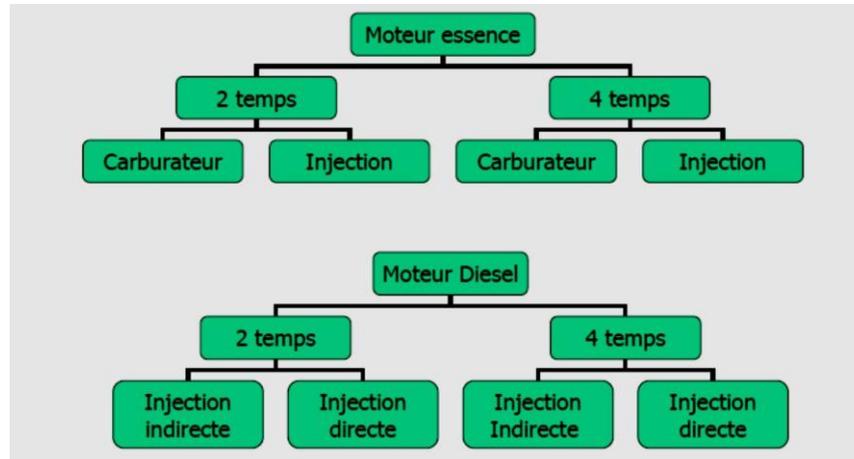


Figure III.14 : Les différents types de moteurs

- **Injection indirecte d'essence**: injection d'essence à basse pression en amont de la soupape d'admission au temps d'admission
- **Injection indirecte de Diesel**: injection de gazole à haute pression dans une chambre de précombustion en de compression

- **Injection directe Diesel:** injection de gazole à très haute pression (2000 bars) directement dans le cylindre en fin de compression
- **Injection d'huile** (moteur deux temps): le mélange essence /huile est effectué par injection d'huile spéciale dans le carburant au temps d'admission

## Conclusion

De tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, eau, vent, soleil...).

L'énergie est un enjeu majeur, tant au niveau politique, économique, scientifique qu'environnemental...

L'énergie peut se transmettre d'un système à un autre : sous forme de chaleur, elle passe d'un radiateur à l'air d'une pièce. Elle peut aussi se transformer en changeant de nature. Dans un jouet mécanique, le ressort se détend en provoquant un mouvement. L'énergie associée au mouvement d'un vélo se transforme, lorsqu'on freine, en chaleur communiquée aux patins des freins et à la jante des roues. L'énergie emmagasinée dans une pile de lampe de poche se change, lorsqu'on ferme le circuit, en énergie électrique ; celle-ci se convertit à son tour dans l'ampoule en énergie lumineuse et calorifique. Dans une centrale thermoélectrique, l'énergie stockée dans le carburant (énergie chimique dans le charbon et le pétrole, ou énergie nucléaire dans l'uranium) est transformée (par combustion ou par réaction nucléaire) en chaleur ; puis une partie de cette chaleur est récupérée dans les turbines sous forme mécanique ; enfin, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique dans les alternateurs. C'est à travers de telles transformations ou de tels transferts que l'énergie se manifeste à nous.

Dans la chaîne énergétique, les pertes sont présentes à tous niveaux. Un des enjeux essentiels est d'améliorer le rendement. Aussi, plusieurs actions sont possibles :

- Améliorer le taux d'extraction des énergies primaires (aujourd'hui, les cadences de puisage imposées nécessitent une injection massive d'eau dans les gisements, le pétrole ainsi extrait est utilisable à 35% à cause du mélange avec l'eau) ;
- Améliorer l'efficacité des procédés qui utilisent les énergies secondaires (un moteur électrique possède un rendement autour de 90% alors qu'un moteur thermique avoisine les 45%).

Référence: 

- [1] M. Lavabre, **Electronique de puissance, conversion de l'énergie**, Editeur: Casteilla 2000.
- [2] Jean-Claude Mauclerc et Yves Aubert, Guide du technicien en électrotechnique: **Pour maîtriser les systèmes de conversion d'énergie**, Editeur : Hachette Technique, 2007.
- [3] Michel Lavabre et Fabrice Baudoin, **Exercices et problèmes de conversion d'énergie : Tome 3, Véhicules électriques**, Editeur : Casteilla 2007.
- [4] Michel Pluviose, **Conversion d'énergie par turbomachines éoliennes turbines à gaz Cogénération génie énergétique**, Editeur : Ellipses Marketing, 2009.
- [5] Leonardo da VINCI Transmission de puissance “**transmission et adaptation de l'énergie**” 1ère année STS Maintenance
- [6] Méziane Boudellal, **La pile à combustible**, Dunod, Technique et ingénierie, 2007
- [7] Brice CANONNE et Yoann SAPANEL « **La pile à combustible** » Techno-Science.net -2004
- [8] Fayolle-Baussian Adrien ;Gorce Yoann ; Leroux Justinien « **Le rayonnement solaire** » Première Scientifique TPE 2011-2012
- [9] R. Bosch. « **Automotive Handbook** ». 5th edition. 2002. Society of Automotive Engineers (SAE)
- [10] G.Ciccarelli. “**Applied Combustion** ». Notes de cours. Queens University.
- [11] M. Ehsani Y. Gao, S Gay & A. Emadi. « **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell vehicles. Fundamentals, Theory and Design** ». CRC press. 2005.
- [12] J.B. Heywood. “**Internal Combustion Engine Fundamentals**”, McGraw-Hill, 1988.
- [13] H. Mèmeteau. « **Technologie fonctionnelle de l'automobile. Tome 1 Le moteur et ses auxiliaires** ». 4ème édition. Dunod 2002.
- [14] Hélène Horsin Molinaro et Bernard Multon “**Conversion d'énergie et efficacité énergétique** ” aspects physiques et technologies de la conversion d'énergie. 6<sup>ème</sup> Ecole Energies et Recherches, Edité le 03/09/2018.

[15] **Dr. Sofia Belaid Lalouni** Support de cours, « **Énergie Solaire Photovoltaïque** », Université A.MIRA de BEJAIA, Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique, Année universitaire 2014/2015.

[16] **Dr. Nassima BERGOUG** Polycopie Pédagogique «**Conversion D'énergie**», Université Batna 22018-2019.

[17] Rosalinda Sanquiche , Hazel Henderson and Timothy Jack Nash” **Report on the Green Transition Scoreboard**” 2011 Ethical Markets Media, LLC,